

余子康,马欣蕊,崔佳祺,等.铁尾矿掺合料对砂浆强度及收缩开裂性能影响研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(2):194-201.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240047
YU Zikang,MA Xinrui,CUI Jiaqi,et al.Investigation of the influence on strength and shrinkage cracking performance of mortar with iron tailings as admixture[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(2): 194-201. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240047

铁尾矿掺合料对砂浆强度及收缩开裂性能影响研究

余子康, 马欣蕊, 崔佳祺, 许 达, 杨明镜, 孙建恒*

(河北农业大学 城乡建设学院, 河北 保定 071001)

摘 要: 为解决铁尾矿大量堆存引发的环境问题, 探究铁尾矿在建材领域的资源化利用。采用比表面积为 $472\text{ m}^2/\text{kg}$ 的铁尾矿粉(472ITP), 以及比表面积分别为 $320\text{ m}^2/\text{kg}$ 、 $430\text{ m}^2/\text{kg}$ 的铁尾矿泥(320ITM、430ITM)作为砂浆掺合料, 研究不同掺量的铁尾矿对砂浆强度和收缩开裂性能的影响。研究表明: 在掺量为10%时, 472ITP10和430ITM10在7 d和28 d的抗压强度和抗折强度未出现下降; 当掺量为20%时, 320ITM20抗压强度最高, 砂浆的收缩应变减少33.03%~38.54%。综合考虑铁尾矿掺合料对砂浆强度与收缩性能的影响, 认为铁尾矿粉及铁尾矿泥的掺量以20%最佳。研究结论可为铁尾矿掺合料在砂浆中的应用提供理论参考。

关键词: 砂浆; 铁尾矿粉; 铁尾矿泥; 力学性能; 收缩开裂; 抗折强度; 抗压强度

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)02-0194-08

Investigation of the influence on strength and shrinkage cracking performance of mortar with iron tailings as admixture

YU Zikang, MA Xinrui, CUI Jiaqi, XU Da, YANG Mingjing, SUN Jianheng*

(College of Urban and Rural Construction, Hebei Agriculture University, Baoding 071001, China)

Abstract: To address the environmental issues caused by the massive stockpiling of iron tailings, this study investigates the resource utilization in the construction materials sector. Using the iron tailings powder (472ITP) with a specific surface area of $472\text{ m}^2/\text{kg}$, iron tailings mud with a specific surface area of $320\text{ m}^2/\text{kg}$ (320ITM) and $430\text{ m}^2/\text{kg}$ (430ITM), respectively, as the admixture of mortar, the influence of iron tailings on the strength and shrinkage cracking performance of mortar was investigated with the replacement ratio of admixture as the experimental variables. The results indicate that when the replacement ratio is 10%, the 472ITP10 and 430ITM10 specimens exhibit no reduction in compressive strength and flexural strength at both 7-day and 28-day curing periods. When the replacement level is increased to 20%, the 320ITM20 formulation demonstrate the highest compressive strength while simultaneously achieving a significant reduction in shrinkage strain ranging from 33.03% to 38.54% compared to the control group. Considering the influence of iron tailings admixture on the strength and shrinkage of mortar, a 20% replacement ratio for iron tailings powder and mud is recommended. The conclusions of the study can provide theoretical references for the application of iron tailings admixture in mortar.

Keywords: mortar; iron tailings powder; iron tailings mud; mechanical properties; shrinkage cracking; compressive strength; flexural strength

0 引言

随着中国钢铁行业的快速发展, 生产过程中产生的大量尾矿废渣对生态环境造成了显著危

害, 亟需探究尾矿废渣的资源化利用方法^[1-3]。截至2018年底, 全国尾矿累计堆存量已达207亿t, 其中铁尾矿占比最大, 约为39.3%^[4]。铁尾矿泥是浮选作业中产生的尾矿废料, 通常以浆状形式排

收稿日期: 2024-03-01 修回日期: 2024-04-01 接受日期: 2024-04-16 责任编辑: 朱含露

基金项目: 河北省重点研发计划项目(19211502D)

作者简介: 余子康(1998-), 男, 广东 汕尾人, 硕士研究生, 主要从事铁尾矿砂浆及混凝土方面的研究。E-mail: 1053068085@qq.com

通信作者: 孙建恒(1962-), 男, 河北 保定人, 博士, 教授, 主要从事混凝土结构及钢结构方面的研究。E-mail: sunjh1962@163.com

出,经过沉淀处理后形成的一种淤积物^[5]。铁尾矿粉则是磁选产生的铁尾矿粉体。河北省迁安市

赵店子镇铁尾矿粉和铁尾矿泥的堆积现场见图1。



(a) 铁尾矿粉



(b) 铁尾矿泥

图1 铁尾矿粉及铁尾矿泥堆积

Fig.1 iron tailings powder and iron tailings mud accumulation

近年来,学者们对铁尾矿的资源化利用进行了大量研究。YANG^[6]等研究表明,铁尾矿粉比表面积经过机械活化至450~550 m²/kg时,作为混凝土掺合料的胶凝活性大于粉煤灰,可起到微集料填充效应。邱玉巧^[5]、王雅琳^[7]研究结果表明,铁尾矿泥和铁尾矿粉经机械活化后活性指数较高,当掺量小于30%时,能使混凝土保持良好的力学性能。这是由于机械活化后的铁尾矿在凝结过程中通过加速水化效应、物理稀释效应和填充密实效应三者协同作用,提高了铁尾矿基水泥胶砂的强度^[8]。ZHANG等^[9]利用铁尾矿粉、粉煤灰和锂矿渣组成的三元掺合料促进了C-S-H、AFt等水化产物的生成,组成的三元矿物掺合料体系配制的混凝土比普通混凝土具有更好的抗酸侵蚀性能。MA等^[10-12]研究表明,由铁尾矿作为混凝土的粗细骨料以及掺合料制成的全铁尾矿混凝土梁和柱均满足平截面假定,承载力均符合国内现行设计规范要求。张永存等^[13]研究表明,在砂浆中掺入适量粉煤灰、硅灰和MgO粉末能降低砂浆的脆性,提高砂浆的抗裂性能,双掺适量粉煤灰和硅灰,还可以弥补粉煤灰对早期强度的不利影响。潘怀兵等^[14]在砂浆中掺入纳米MgO,提高水泥砂浆的28 d抗压强度及水化热,砂浆的自收缩也得到改善。DHEYAALDIN等^[15]研究表明,聚丙烯纤维和纳米材料可降低砂浆的收缩值。

综上可知,当铁尾矿的细度达到要求时,可作为矿物掺合料使用^[16],但是掺合料对砂浆强度及收缩开裂性能的研究较少。因此,本文利用比表

面积为472 m²/kg的铁尾矿粉、比表面积为320 m²/kg和430 m²/kg的铁尾矿泥作为砂浆掺合料,研究不同掺量下三种掺合料对砂浆强度和收缩开裂性能的影响。

1 研究方法

1.1 原材料与配合比

采用京兰牌P·O42.5水泥,比表面积为344.2 m²/kg。铁尾矿掺合料取自唐山市迁安赵店子镇。将铁尾矿粉和铁尾矿泥筛分并烘干后,使用QM-QX12L型全方位行星磨机进行粉磨。其中,铁尾矿粉(ITP)经40 min粉磨后,比表面积为472 m²/kg(472ITP)^[7];铁尾矿泥(ITM)经10 min和15 min粉磨后,比表面积分别为320 m²/kg(320ITM)和430 m²/kg(430ITM)^[6]。根据《用于水泥中的火山灰质混合材料》(GB/T 2847—2022)^[17]测定,二者均无火山灰活性。试验采用比表面积为293.2 m²/kg的Ⅱ级粉煤灰(FAM),胶凝材料的化学成分见表1。细骨料选用天然河砂,细度模数为2.83;拌和及养护用水均为自来水。

表1 胶凝材料的化学成分

Tab.1 chemical composition of cementitious material						
材料	质量分数/%					
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	其他
水泥	62.12	21.35	2.99	7.75	3.19	2.60
铁尾矿泥	3.31	75.36	3.98	6.55	6.65	4.15
铁尾矿粉	3.15	62.14	4.14	3.20	25.12	2.25
粉煤灰	14.60	34.50	2.70	26.4	5.70	16.10

由表 1 可见,铁尾矿泥的主要化学成分为 SiO_2 ,质量分数为 75.36%,高于铁尾矿粉的相应含量;而 Fe_2O_3 的质量分数仅为 6.65%,远低于铁尾矿粉的相应含量;铁尾矿粉与铁尾矿泥中均未检测出放射性和有害化学元素。

1.2 试验方法

(1) 砂浆配合比

为了更好地检测砂浆的抗裂性能,保证其流

动性,考虑到低水胶比砂浆更容易开裂(更适用于试验观测)^[18-21],试验中力学性能及圆环收缩开裂的砂浆试块水胶比取 0.35,胶砂比取 1:1.5。设置砂浆掺合料掺量分别为 10%、20%、30%,并以纯水泥砂浆(PM)和粉煤灰(FAM)掺量为 30%的砂浆作为试验对照组。试验组分别采用 320ITM、430ITM 以及 472ITP 作为掺合料,替代率分别为 10%、20%、30%。砂浆配合比见表 2。

表 2 砂浆配合比
Tab.2 mortar mix ratio

试块编号	水胶比	水/(kg·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	河砂/(kg·m ⁻³)	掺合料/(kg·m ⁻³)			
					铁尾矿粉	320ITM	430ITM	粉煤灰
PM	0.35	70	200	300				
472ITP10	0.35	70	180	300	20			
472ITP20	0.35	70	160	300	40			
472ITP30	0.35	70	140	300	60			
320ITM10	0.35	70	180	300		20		
320ITM20	0.35	70	160	300		40		
320ITM30	0.35	70	140	300		60		
430ITM10	0.35	70	180	300			20	
430ITM20	0.35	70	160	300			40	
430ITM30	0.35	70	140	300			60	
FAM	0.35	70	140	300				60

注:试块编号中 ITP、ITM 后面的数据表示掺合料掺量的百分数。

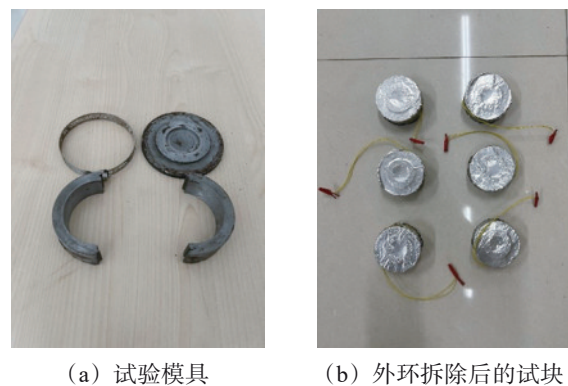
(2) 砂浆试块力学性能试验

根据水泥胶砂试验规范^[22]的要求,试块尺寸取 40 mm×40 mm×160 mm。将配制好的砂浆分 2 次浇筑到三联试模中,第一次浇筑至试模高度的 1/3 处,第二次浇筑至填满。每次浇注后均在振实台上振动 60 s,刮平表面后连同试模一起养护 24 h,随后取出试块。将试块分别养护至 7 d 和 28 d,测试其抗压强度和抗折强度。

(3) 砂浆圆环收缩开裂试验

采用《混凝土结构耐久性设计与施工指南(2005 年修订版)》(CCES 01—2004)^[23]中的圆环法进行收缩抗裂性试验。试验模具由河北沧州胤沣试验仪器公司生产,包括内环、外环和底座。试块内环半径为 41.3 mm,外环半径为 66.7 mm,高为 25.4 mm。试验时,首先在内环外表面涂抹脱模剂,然后浇筑水泥砂浆。试块成型后立即移入养护室,经过 24 h 标准养护后拆去外环。在试块顶面和底面粘贴铝箔胶带进行密封处理,随后将试块连同模具内环放置在聚四氟乙烯板上,在试块外侧面贴应变片后移入养护箱。养护箱内温度

为(20±0.5)°C,相对湿度为 50%±10%。按表 2 的配合比,每组配合比制作 3 个试块,观测时间为 28 d,电脑自动记录试块收缩数据和初裂时间。试验模具及拆去外环后的试块见图 2。



(a) 试验模具 (b) 外环拆除后的试块

图 2 试验模具及试块

Fig.2 test mould and test specimens

2 结果与分析

2.1 砂浆的力学性能

不同掺量下砂浆的抗压强度见图 3,不同掺量下砂浆的抗折强度见图 4。

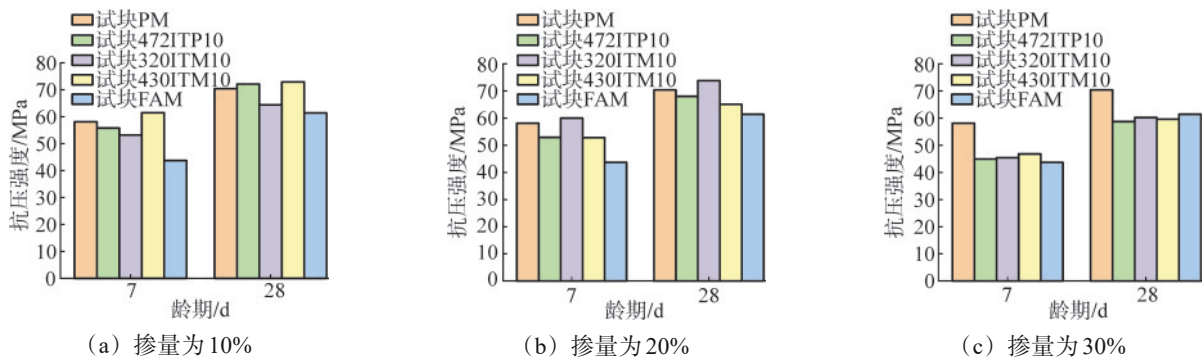


图3 铁尾矿不同掺量下砂浆的抗压强度

Fig.3 compressive strength of mortar under different iron tailings content

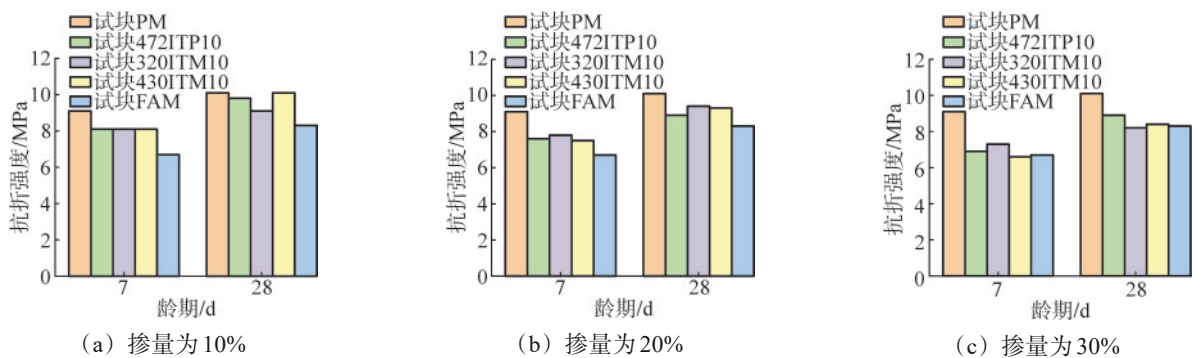


图4 铁尾矿不同掺量下砂浆的抗折强度

Fig.4 flexural strength of mortar under different iron tailings content

由图3(a)和图4(a)可见,铁尾矿粉及铁尾矿泥掺量为10%时,7d养护龄期下,只有试块430ITM10的抗压强度超过了试块PM,试块472ITP10和试块320ITM10的抗压强度略低于试块PM;28d养护龄期下,试块472ITP10和试块430ITM10的抗压强度均有所提升。其中,试块430ITM10的抗压强度最高,比试块PM提高了3.55%,而试块320ITM10相对于试块PM降低了8.52%。7d养护龄期时,3种试块的抗折强度基本相同,与PM相比,降低了10.99%;养护龄期为28d时,试块430ITM10与试块PM的抗折强度持平,未出现下降。而试块472ITP10和试块320ITM10的抗折强度分别下降了2.97%和9.9%。铁尾矿掺量为10%的3种砂浆,抗压、抗折强度均高于FAM的相应值,与养护龄期相关性较小。

由图3(b)和图4(b)可见,472ITP20、320ITM20和430ITM20的性能均优于粉煤灰掺量为30%的砂浆试块FAM。试块472ITP20和试块430ITM20的抗压强度相比掺量为10%的情况均有下降。与试块PM相比,试块472ITP20和试块

430ITM20在7d的抗压强度分别下降了8.95%、9.12%,在28d的抗压强度分别下降了3.41%、7.53%;而试块320ITM20的抗压强度则超过了试块472ITP20和试块430ITM20,试块320ITM20在7d和28d的抗压强度,相对于试块PM分别提升了3.27%、4.83%。在抗折强度方面,28d龄期的试块320ITM20表现最佳,仅比试块PM降低了6.93%。由图3(c)和图4(c)可见,当铁尾矿掺量从20%增加到30%时,3类试块的抗压强度和抗折强度均下降,其中7d与28d的抗压强度和抗折强度与FAM的相应值相差不大。

铁尾矿砂浆强度随掺量变化情况见图5。由图5(a)可见,当铁尾矿掺量为10%时,试块472ITP10和试块430ITM10在28d的抗压强度均高于试块PM,而试块320ITM10在28d的抗压强度则低于试块PM;当铁尾矿掺量为20%时,试块320ITM20在28d的抗压强度最高,超过试块PM,而试块472ITP20及试块430ITM20在28d的抗压强度则大幅下降;当铁尾矿掺量达到30%时,3种铁尾矿砂浆的抗压强度均快速下降。图5(b)表明,

随着铁尾矿掺量的增加, 3 种铁尾矿砂浆的抗折强度总体上呈下降趋势, 但 320ITM 在掺量为 20% 时, 其 28 d 抗折强度反而超过了掺量为 10% 时的

相应值。

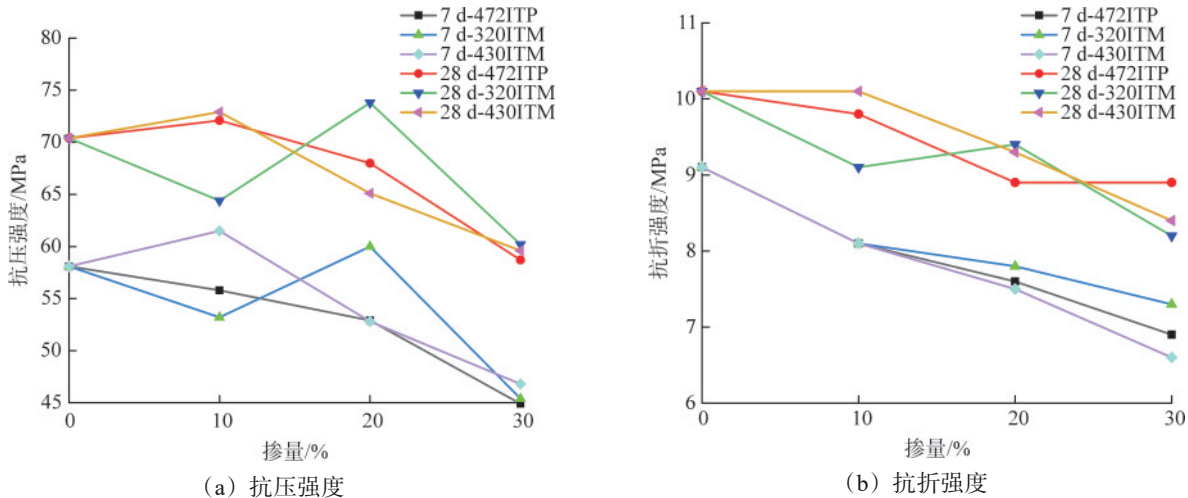


图 5 铁尾矿砂浆强度随掺量变化

Fig.5 variation of tailings mortar strength with tailings content

由上述分析可知, 铁尾矿粉及铁尾矿泥不具有火山灰活性, 在砂浆中仅起到微集料填充作用^[6-7]。从砂浆强度的角度考虑, 铁尾矿粉和铁尾矿泥作为掺合料时, 掺量应控制在 20% 以内。当掺量为 20% 时, 比表面积为 320 m²/kg 的铁矿泥表现最优; 与比表面积为 472 m²/kg 的铁尾矿粉相比,

由于铁尾矿泥的初始细度远高于铁尾矿粉, 因此比表面积粉磨至 320 m²/kg 时仅需 10 min, 具有更高的性价比。

2.2 抗裂性能

各组圆环收缩开裂试块应变情况见图 6。

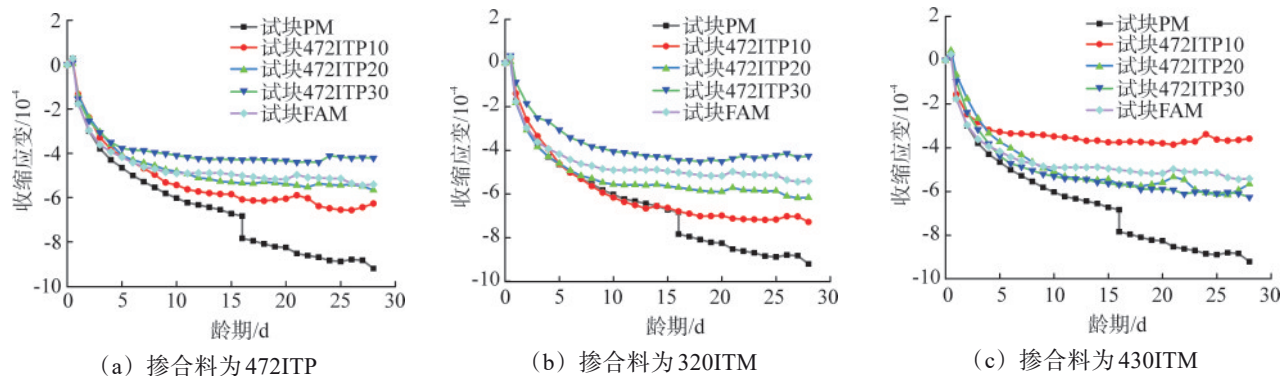


图 6 掺合料对砂浆的收缩影响

Fig.6 effect of admixture on the shrinkage of mortar

由图 6 可见, 与纯水泥砂浆试块 PM 相比, 掺入粉煤灰、铁尾矿粉和铁尾矿泥的试块, 收缩应变均有不同程度的减小。试块 PM 的应变片在养护龄期为 16.5 d 时存在应力突变, 收缩应变增加了 1.01×10^{-4} , 表明此时试块已开裂^[23], 同时可观察到试块表面出现裂缝, 但未发生断裂。而掺入粉煤灰、铁尾矿粉和铁尾矿泥的试块, 在 28 d 的试验期间均未出现开裂现象。

由图 6 (a) 和图 6 (b) 可见, 以 472ITP 和

320ITM 作为掺合料时, 随着掺量的增加, 砂浆的收缩应变逐渐减小。其中, 试块 472ITP20 和试块 472ITP30 在养护龄期达到 7 d 后收缩应变增加缓慢; 试块 472ITP30 的收缩应变小于试块 FAM, 而试块 472ITP20 的收缩应变与试块 FAM 基本相同。试块 320ITM20 和试块 320ITM30 在养护龄期达到 10 d 后, 收缩应变基本保持稳定; 试块 320ITM30 的收缩应变低于试块 FAM, 但试块 320ITM20 的收缩应变略高于试块 FAM。由于铁尾矿粉及铁尾矿

泥不具有火山灰活性,在砂浆凝结硬化过程中消耗的水量较少,导致砂浆试块的收缩应变随着掺量的增加而减小。在相同掺量条件下,由于粉煤灰具有火山灰活性,在砂浆凝结硬化过程中消耗的水量较多,因此试块FAM的收缩应变比试块472ITP30及试块320ITM30的相应值更大。

由图6(c)可见,当铁尾矿泥的比表面积增大至 $430\text{ m}^2/\text{kg}$ 时,试块430ITM10的收缩应变最小,低于试块PM和试块FAM的相应值;而试块430ITM20和试块430ITM30的收缩应变接近,且略高于试块FAM。产生这种现象的原因为:尽管

铁尾矿粉不具有火山灰活性,但较高比表面积的铁尾矿粉能够促进砂浆的水化反应,且随着比表面积的增大,促进水化反应的作用增强^[24]。铁尾矿泥过大的比表面积会增强砂浆的水化反应,从而消耗更多的水分。由于430ITM的活性指数高于472ITP和320ITM,因此随着掺量的增加,砂浆的收缩量会增大。

为进一步比较ITP、320ITM和430ITM对砂浆收缩性能的影响,对比同一掺量下3种掺合料的收缩应变,结果见图7。

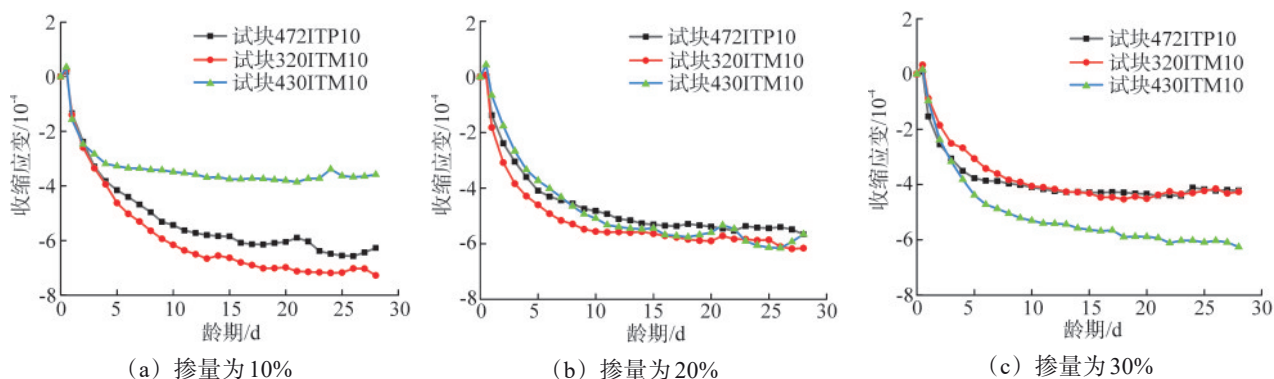


图7 铁尾矿掺量对砂浆收缩应变对比

Fig.7 comparison of tailings content on shrinkage strain of mortar

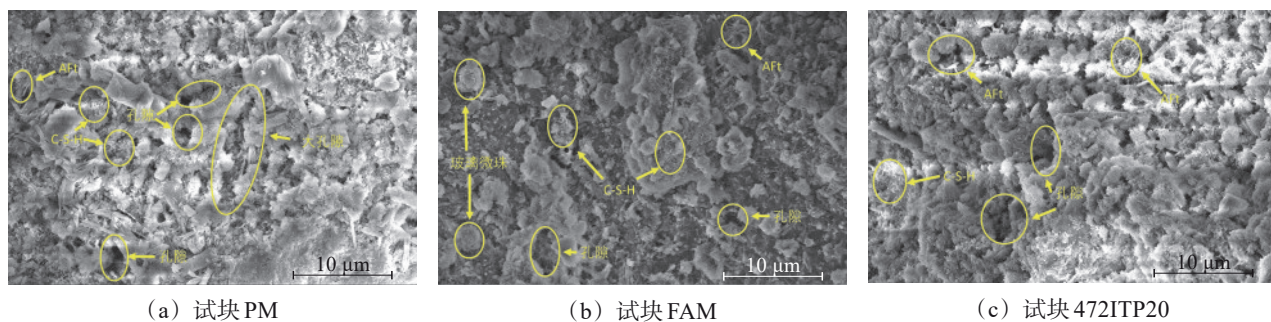
以28d养护龄期为例,当掺量为10%时,430ITM10的收缩应变最小,比PM和FAM分别降低了61.01%和34.10%。当掺量为20%时,472ITP20、320ITM20和430ITM20的收缩应变接近,比PM降低了33.03%~38.54%。当掺量为30%时,472ITP30与320ITM30的收缩应变相差较小,比PM降低了36.11%~41.10%;而FAM的28d收缩应变比PM降低了40.83%。说明472ITP30、320ITM30和FAM对减少砂浆收缩效果接近。

综合考虑铁尾矿掺合料对砂浆强度与收缩性

能的影响,认为铁尾矿粉及铁尾矿泥的掺量以20%最佳。其中,320ITM由于粉磨成本较低,具有更好的应用前景。对于对收缩性能要求严格的砂浆,可采用比表面积为 $430\text{ m}^2/\text{kg}$ 、替代率为10%的铁尾矿泥作为掺合料。

2.3 砂浆微观结构分析

为进一步分析铁尾矿粉和铁尾矿泥对砂浆收缩性能的影响,以PM、FAM、472ITP20、320ITM20和430ITM20为例,通过SEM来分析它们的微观结构,各试块的SEM图见图8。



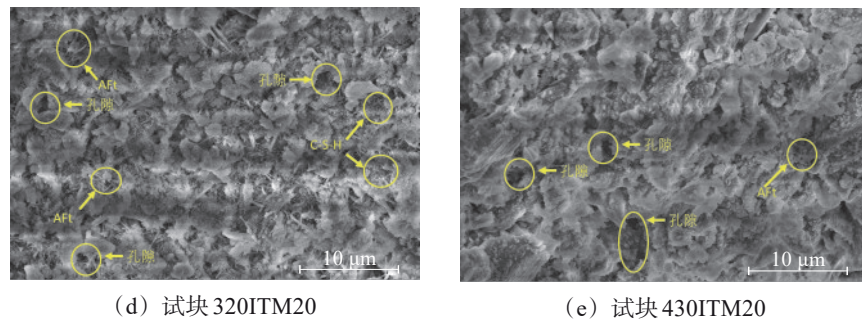


图8 砂浆SEM图

Fig.8 SEM image of mortar

由图8(a)和图8(b)可见,与PM相比,掺加30%的粉煤灰后,砂浆的孔隙结构得到了显著改善,进而有效抑制了水泥基材料的收缩。由图8(b)可观察到圆形颗粒为粉煤灰玻璃微珠体。粉煤灰含有活性 SiO_2 和活性 Al_2O_3 ,经过二次水化反应后生成C-S-H凝胶,形成致密的水化硅酸钙结构,进而减少收缩并改善抗裂性能。此外,粉煤灰细化了孔隙结构,减少了混凝土中有害孔和多害孔的数量。

由图8(c)、图8(d)和图8(e)可见,与PM相比,472ITP20、320ITM20和430ITM20的大孔隙数量显著减少,铁尾矿泥和铁尾矿粉颗粒与周围水化产物(C-S-H)紧密结合,起到了良好的填充作用,细化了砂浆的孔隙结构,抑制了砂浆的收缩。其中,320ITM20的空隙数量虽然比472ITP20和430ITM20多,但其大孔隙更少,孔隙结构更加细化。这一结果与文献[25]中关于尾矿粉作为混凝土掺合料的压汞试验结果以及最紧密堆积试验和分析结果一致。这也是320ITM20在28d龄期时比472ITP20和430ITM20具有更高抗压强度的原因。

3 结论

(1) 当掺量为10%时,与PM相比,472ITP10和430ITM10的7d和28d的抗压强度和抗折强度基本未出现下降;而在掺量为20%的情况下,320ITM20的抗压强度最高。

(2) 铁尾矿粉与铁尾矿泥在砂浆水化过程中表现出低水分消耗特性,在微观结构上,其微集料填充效应显著优化了砂浆的孔隙结构,从而降低收缩开裂风险。当掺量控制在20%时,472ITP20、320ITM20和430ITM20的收缩应变基本相同。

(3) 基于对铁尾矿掺合料影响砂浆强度与收缩性能的系统考量,建议铁尾矿粉及铁尾矿泥的掺量取20%。另外,比表面积达 $320\text{ m}^2/\text{kg}$ 的铁尾矿泥,因其较低粉磨成本及对砂浆强度的微弱负面效应,在砂浆掺合料领域具有更高的应用价值。

参考文献(References):

- [1] 王晓雷,陈超,甘德清,等.唐山地区铁尾矿综合利用及产业化研究[J].矿业研究与开发,2011,31(2):44-47,81.
WANG Xiaolei, CHEN Chao, GAN Deqing, et al. Study on comprehensive utilization of iron tailing and its industrialization in Tangshan area[J]. Mining Research and Development, 2011, 31(2): 44-47, 81.
- [2] 郝负洪,王韞辉,李京,等.利用煤矸石、铁尾矿制备固废烧结砖[J/OL].矿产综合利用,1-10[2024-04-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231113.1037.006.html>.
HAO Yunhong, WANG Yunhui, LI Jing, et al. Preparation of solid waste sintered brick from coal gangue and iron tailings[J/OL]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources: 1-10[2024-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231113.1037.006.html>.
- [3] TIAN G Y, HUA X, NIE K L, et al. Lamellar mesoporous Mg-containing silicate adsorbents derived from iron ore tailings for high-efficient adsorption of mycotoxins and antibiotics[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 330: 125556.
- [4] 任明昊,谢贤,李博琦,等.铁尾矿综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2022,42(3):155-168.
REN Minghao, XIE Xian, LI Boqi, et al. Research progress on comprehensive utilization of iron tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(3): 155-168.
- [5] 邱玉巧.尾矿泥的细度优化及其对混凝土性能影响试验研究[D].保定:河北农业大学,2022:60.
- [6] YANG M J, SUN J H, DUN C Y, et al. Cementitious activity optimization studies of iron tailings powder as a concrete admixture[J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120760.
- [7] 王雅琳.铁尾矿粉-矿渣粉复掺混凝土配合比优化研究[D].保定:河北农业大学,2022:66-67.
- [8] 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[2024-04-01]. <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 tailings[J/OL]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022: 1-29[2024-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20220112.1844.002.html>.
- [9] ZHANG B, ZHANG Y N, LIU W L, et al. Effect of iron tailing powder-based ternary admixture on acid corrosion resistance of concrete[J]. Materials, 2023, 16(10): 3688.
- [10] MA X X, SUN J H, ZHANG F S, et al. Experimental studies and analysis on axial compressive properties of full iron tailings concrete columns[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01881.
- [11] MA X X, SUN J H, ZHANG F S, et al. Mechanical behaviour evaluation of full iron tailings concrete columns under large eccentric short-term loading[J]. Materials, 2023, 16(6): 2466.
- [12] MA X X, SUN J H, ZHANG R L, et al. Experimental studies on flexural behavior of full iron tailings concrete beams[J]. Structural Concrete, 2023, 24(6): 7222-7236.
- [13] 张永存, 李青宁, 房辰泽. 矿物掺合料改善水泥砂浆脆性和抗裂性的研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(9): 126-130.
- ZHANG Yongcun, LI Qingning, FANG Chenze. Study of mineral admixtures on improving the brittleness and crack resistance of cement mortar[J]. Yellow River, 2016, 38(9): 126-130.
- [14] 潘怀兵, 陈正雄, 杨率. 纳米MgO对高性能水泥砂浆自收缩性能及抗压强度的影响研究[J]. 应用化工, 2020, 49(3): 583-587.
- PAN Huaibing, CHEN Zhengxiong, YANG Shuai. Study on the effects of nano-MgO on the autogenous shrinkage performance and compressive strength of high performance cement mortar[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(3): 583-587.
- [15] DHEYAALDIN M H, ALI MOSABER PANAH M, ALZEEBAREE R. Shrinkage behavior and mechanical properties of alkali activated mortar incorporating nanomaterials and polypropylene fiber[J]. Ceramics International, 2022, 48(16): 23159-23171.
- [16] 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 Yunfen, LIU Jintao, ZHAO Siru, et al. Effect mechanism of iron tailing powder on cement mortar properties[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(5): 1149-1157.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 用于水泥中的火山灰质混合材料: GB/T 2847—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022, 1-10.
- [18] 朱志远, 岑国平, 王硕太, 等. 基于正交试验的水泥砂浆开裂敏感性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(4): 561-566.
- ZHU Zhiyuan, CEN Guoping, WANG Shuotai, et al. Study on the cracking sensitivity of cement mortar based on orthogonal experiment[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2010, 42(4): 561-566.
- [19] 张王田, 张云升, 吴志涛, 等. 玻璃纤维增强水泥基材料组成优化设计与性能[J]. 材料导报, 2019, 33(7): 2331-2336.
- ZHANG Wangtian, ZHANG Yunsheng, WU Zhitao, et al. Optimization design and properties of glass fiber reinforced cementitious composites[J]. Materials Reports, 2019, 33(7): 2331-2336.
- [20] 张延年, 王众新, 李志军, 等. 复合掺合料对混凝土的改性试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(6): 1100-1107.
- ZHANG Yannian, WANG Zhongxin, LI Zhijun, et al. Experiment on modification of concrete with compound admixture[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2023, 39(6): 1100-1107.
- [21] 张延年, 刘文亮, 张文洁, 等. 铁尾矿-钢渣-磷渣协同制备矿物掺合料试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(3): 314-321.
- ZHANG Yannian, LIU Wenliang, ZHANG Wenjie, et al. Experimental study on synergistic preparation of mineral admixtures with iron tailings-steel slag-phosphorus slag[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(3): 314-321.
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021, 1-18.
- [23] 中国土木工程学会. 混凝土结构耐久性设计与施工指南: CCES 01—2004[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005, 60-62.
- [24] 顾晓薇, 殷士奇, 张伟峰, 等. 机械活化对铁尾矿火山灰活性的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(8): 1168-1175, 1200.
- GU Xiaowei, YIN Shiqi, ZHANG Weifeng, et al. Effect of mechanical activation on pozzolanic activity of iron tailings[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(8): 1168-1175, 1200.
- [25] 杨明镜, 孙建恒, 徐阳, 等. 铁尾矿粉对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能影响及机理分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(11): 177-185.
- YANG Mingjing, SUN Jianheng, XU Yang, et al. Analysis of influence from iron tailings powder on sulfate corrosion resistance of concrete and its mechanism[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(11): 177-185.