

纤维增强铁尾矿砂水泥基材料力学性能和孔隙结构实验

张海军, 李涛, 展猛

(黄淮学院建筑工程学院, 河南 驻马店 463000)

摘要: 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。本文详细研究和讨论了铁尾矿砂和 PVA 纤维对水泥基复合材料抗压强度、四点抗弯强度、弯曲韧性、孔隙结构。此外, 建立了抗压强度与四点抗弯强度之间换算关系。结果表明: 铁尾矿砂掺入对力学性能有增强效果, 并且这种增强效果随着取代率的增加呈现先增加后减小趋势。而 PVA 纤维掺入后力学性能进一步提升, 并且呈现出良好韧性。此外, 铁尾矿砂取代率 40% 和 PVA 纤维复合时, 基体内部孔隙明显降低。因此, 认为当铁尾矿砂取代率为 40% 与 PVA 纤维结合, 水泥基复合材料拥有良好的力学性能。

关键词: 陶瓷及复合材料; PVA 纤维; 铁尾矿砂; 力学性能; 孔隙结构

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.04.030

中图分类号: TD989;TU528 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 04-0203-08

引用格式: 张海军, 李涛, 展猛. 纤维增强铁尾矿砂水泥基材料力学性能和孔隙结构实验[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(4): 203-210.

ZHANG Haijun, LI Tao, ZHAN Meng. Mechanical properties and pore structure of fiber reinforced iron tailings cement-based materials[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 203-210.

随着全球钢铁冶金工业的快速发展, 产生了大量的工业副产品。铁尾矿砂作为钢铁冶金工业的主要副产品之一, 其堆放量在逐年增加, 占用了大量土地并且使土壤遭受污染, 严重影响着生态环境^[1-4]。如果可以将这些废弃的铁尾矿砂作为建筑材料的组成成分加以利用, 不仅可以保护环境, 减少自然资源的过分消耗, 还可以降低建筑材料的生产成本^[5-6]。

最常用的方法是将铁尾矿砂作为细骨料替代天然河砂制备水泥基复合材料。基于此国内外的学者进行了一些研究。冯卡等^[7]将硫铁矿尾矿渣作为制备混凝土的骨料, 研究了其力学和耐久性能。Kuranchie 等^[8]发现铁尾矿砂替代混凝土中的细骨料时, 抗压强度提高 11%。Shettima 等^[9]将铁尾矿砂以不同比例取代细骨料, 结果表明, 所得到的混合料的抗压强度均不同程度增加。宁波^[10]等研究了含水率、干密度和铁尾矿砂粒径等三个

指标对铁尾矿砂混凝土应力-应变曲线、粘聚力和内摩擦角的影响。Tang 等^[11]研究发现当铁尾矿含量为 25%~50% 时, 力学性能有所提高。

铁尾矿不仅可以废物再利用, 而且还能使水泥基复合材料性能有所提升。因此, 本文对铁尾矿砂作为骨料的 PVA 纤维增强水泥基复合材料进行了抗压强度、四点抗弯强度、弯曲韧性, 孔隙结构的研究。为铁尾矿砂作为骨料的纤维水泥基复合材料在更大范围的应用提供依据。

1 实验

1.1 实验材料

1.1.1 胶凝材料

实验所用的胶凝材料由有三部分组成, 包含强度等级为 P·O 42.5R 的普通硅酸盐水泥 (OPC), 偏高岭土 (MK) 和一级粉煤灰 (FA), 三种材料矿物化学成分和物理性能指标分别见表 1、2。

收稿日期: 2022-09-26

基金项目: 陕西省自然科学基金 (2021JQ-844)

作者简介: 张海军 (1979-), 男, 实验师, 研究方向为混凝土材料。

通信作者: 李涛 (1988-), 男, 研究方向为混凝土材料。

表1 水泥、偏高岭土和粉煤灰的化学组成/%

Table 1 Chemical composition of OPC, FA and MK

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	其他
OPC	55.7	42.5	0.4	/	0.3	0.9	/	0.2
MK	22.1	5.0	63.8	0.9	5.5	/	2.1	0.6
FA	52.97	29.96	3.66	1.52	7.98	/	0.65	3.26

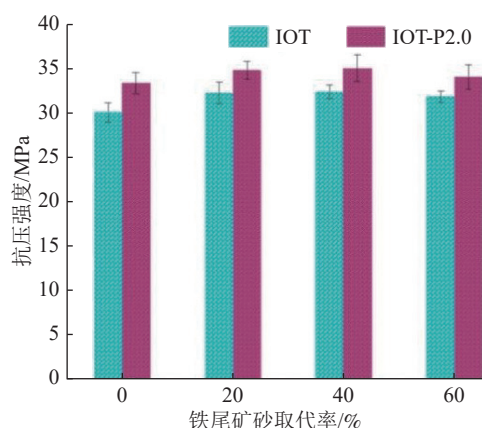
表2 水泥的物理性能

Table 2 Physical property of OPC

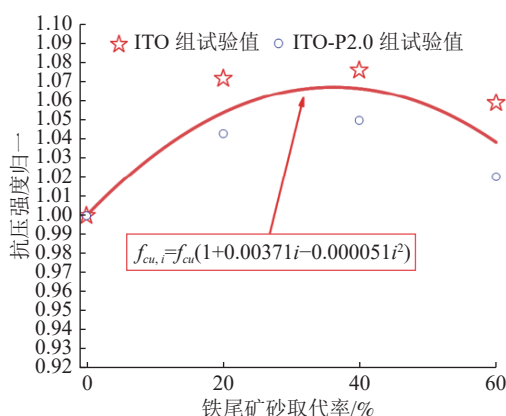
密度/ (g/cm ³)	细度/%	比表面积/ (m ² /g)	凝结时间/min 初凝 终凝	28 d 抗压 强度/MPa
3.10	≤8.0	0.35	≥60 ≤300	51.9

1.1.2 细骨料

细骨料由 120 纳米的石英砂 (S) 和铁尾矿砂 (IOTs) 组成。采用 EDS 测定铁尾矿砂元素组成, 见图 1 和表 3, 主要物理性能指标见表 4。



(a) 铁尾矿取代率对抗压强度的影响



(b) 铁尾矿取代率和抗压强度的关系

图1 抗压强度结果对比分析

Fig.1 Comparative analysis of compressive strength

表3 铁尾矿砂矿物组成成分/%

Table 3 Mineral composition of IOTs

C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Ti
0	56.49	6.95	8.38	17.46	/	3.02	1.68	5.28	0.74

表4 铁尾矿砂物理性能指标

Table 4 Physical properties of IOTs

	表观密度/ (kg/m ³)	堆积密/ (kg/m ³)	吸水率/%	含泥量/%	压碎 指标/%
IOTs	2 745	1 824	8.7	2.9	19.53

1.2 配合比

水胶比为 0.3, 胶砂比 0.45, 辅助型胶凝材料占比 45% (包含 30% 的粉煤灰和 15% 的偏高岭土), 分别设计了铁尾矿砂取代率 0、20%、40% 和 60% 的 IOT 组, 以及在 IOT 组的基础上掺入 2% PVA 纤维的 IOT-P2.0 组, 共计 8 组, 见表 5。其中 “N-S” “IOT-S” “MK” “PF” 分别代表石英砂、铁尾矿砂、偏高岭土、PVA 纤维。

1.3 实验内容

1.3.1 力学性能测试

根据 GB/T 50081—2003《普通混凝土力学性能实验方法标准》、CECS 13—2009《纤维混凝土实验方法标准》, 使用 MTS 微机控制电液伺服万能实验机作为装载装置, 通过更换夹头, 分别测试立方体抗压强度、四点弯曲强度。上述每种测试所使用的测量试块尺寸分别为 100 mm×100 mm×100 mm、300 mm×76 mm×13 mm。

1.3.2 核磁共振孔隙测试

孔隙测试采用磁场大小为 0.3 T、共振频率 50~60 Hz、线圈直径 60 mm 的 Macro MR12-150H-I 型核磁共振仪。在测试前, 采用加压饱和装置对试块进行饱和处理, 使水完全渗透试块, 然后再进行孔隙测试。通过核磁共振弛豫时间 T_2 衰减这一项原理, 通过 T_2 谱曲线的积分面积变化, 反映基体内部孔隙率的变化。

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

各配合比立方体试块 28 d 的抗压强度被测试, 实验结果的平均值见图 1 (a)。可以看出, 在 IOT 组中, IOT 20、IOT 40、IOT 60 抗压强度相比于 IOT0 分别提高了 7.2%、7.6%、5.9%; 在 IOT-P2.0 组中, IOT 20-P2.0、IOT 40-P2.0、IOT 60-P2.0 抗压强度相比于 IOT0-P2.0 分别提高了 4.3%、5.0%、2.0%。从上述可以看出铁尾矿砂对抗压强度有正向影响, 特别是在取代率为 40% 时, 这种正向影响比较明显。而取代率大于 40% 后, 增强效果会有所减小。这主要归因于铁尾矿

表5 配合比/(kg/m³)
Table 5 Mix proportion

组	编号*	N-S	IOT-S	W	FA	MK	C	SP	PF
IOT	IOT0	565.6	0	440.3	377.4	188.7	692	5.66	0
	IOT20	452.48	113.12	440.3	377.4	188.7	692	5.66	0
	IOT40	339.36	226.24	440.3	377.4	188.7	692	5.66	0
	IOT60	226.24	339.36	440.3	377.4	188.7	692	5.66	0
IOT-P2.0	IOT0-P2.0	565.6	0	440.3	377.4	188.7	692	5.66	26
	IOT20-P2.0	452.48	113.12	440.3	377.4	188.7	692	5.66	26
	IOT40-P2.0	339.36	226.24	440.3	377.4	188.7	692	5.66	26
	IOT60-P2.0	226.24	339.36	440.3	377.4	188.7	692	5.66	26

*1对于编号命名,以“IOT20-P2.0”为例,IOT代表铁尾矿砂;P代表PVA纤维;数字“20”和“2.0”代表铁尾矿砂掺量和PVA纤维体积掺量。

砂具有“填充效应”和“火山灰效应”,特别是“火山灰效应”发挥作用较明显。当铁尾矿砂被掺入后,铁尾矿砂内部的活性SiO₂充分与水泥中的Ca(OH)₂水化反应生成大量额外的C-S-H凝胶材料,这些C-S-H胶凝能够很好的填充基体内部孔隙及改善基体结构,使得抗压强度增加。但是,当铁尾矿砂取代率过大时,会导致细骨料级配不良,使基体内部引入缺陷,这些缺陷会使基体内部孔隙及微裂缝增加,导致抗压强度会降低。对比IOT0,IOT0-P2.0和IOT40-P2.0可以发现,相比于IOT0,IOT0-P2.0和IOT40-P2.0抗压强度分

别提高了10.87%和16.39%。这主要是因为掺入的纤维乱向分布于基体内部与凝胶相互包裹在一起,形成空间网格体系,使试件类似处于三向受力状态,在加载过程中,能够有效消耗加载过程中的能量,并且这种网格体系随着基体土内部C-S-H胶凝量的增加而越牢固稳定。

此外,通过非线性拟合了铁尾矿取代率和抗压强度之间关系,见图1(b)和式(1)。表6为实验值与式(1)计算的预测值对比,可以看出两者误差范围在-0.07%~1.8%之间,相对较小。

$$f_{cu,i} = f_{cu}(1 + 0.00371i - 0.000051i^2) \quad (1)$$

表6 抗压强度实验值与计算值间误差
Table 6 Error between test results of compressive strength and calculation results of Eq

组	IOT				IOT-P2.0			
编号	IOT0	IOT20	IOT40	IOT60	IOT0-P2.0	IOT20-P2.0	IOT40-P2.0	IOT60-P2.0
实验值	30.08	32.24	32.27	31.85	33.35	34.78	35.01	34.03
计算值	30.08	31.69	32.09	31.25	33.35	35.14	35.58	34.65
误差范围	-0.07%~1.8%							

2.2 四点抗折强度

抗折强度实验结果的平均值见图2。从图2(a)看出,与立方体抗压强度的变化趋势相似,随着铁尾矿砂取代率增加,抗折强度呈现先增加后减小趋势。对于IOT组和IOT-P2.0组,铁尾矿砂取代率40%时,IOT40和IOT40-P2.0的抗弯强度均达到极大值,分别为3.79 MPa和4.61 MPa。此外,IOT0-P2.0和IOT40-P2.0相比于IOT0分别增长了14.56%和26.64%。这主要是由于掺入纤维后,纤维与基体内部C-S-H凝胶粘结在一起,共同受力,抑制裂缝开展,起到桥联阻裂作用,并且在铁尾矿砂取代率40%时,基体内部能够生成大量

的C-S-H凝胶,纤维被这些凝胶更加充分的包裹,基体与纤维间界面粘结应力增加,桥连阻裂的效果进一步加强,使得抗折强度提升。

抗折强度和铁尾矿砂之间的关系见图2(b)和式(2)。表7为实验值与式(2)计算的预测值对比,两者误差范围在-1%~5%之间,采用公式(2)所预测得值与实验值之间吻合较好。

$$f_{f,i} = f_f(1 + 0.00147i - 0.000008i^2) \quad (2)$$

综上所述,相比于单掺纤维或者铁尾矿砂,取代率40%的铁尾矿砂与纤维组合在一起时,对水泥基复合材料的力学性能增强效果较好,特别

是对抗折强度的增强效果。IOT40-P2.0 具有较好

的力学性能。

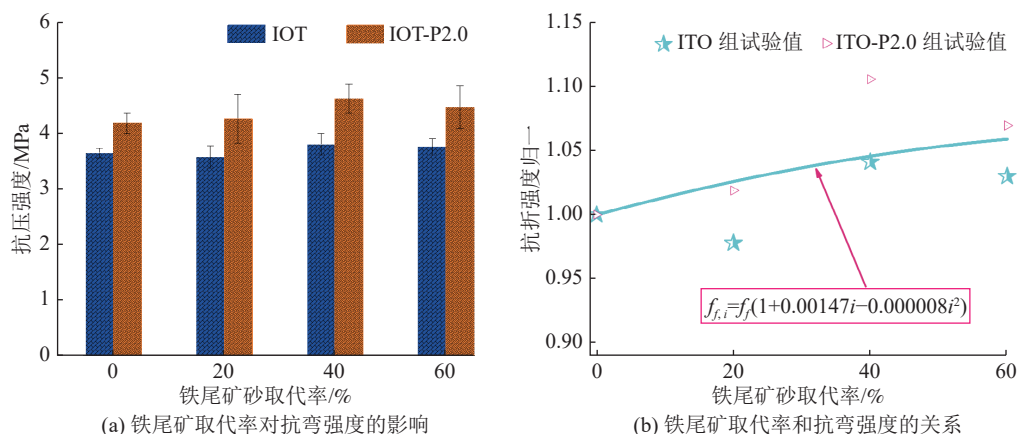


图2 抗弯强度结果对比分析

Fig.2 Comparative analysis of flexural strength

表7 抗折强度实验值与计算值间误差

Table 7 Error between test results of flexural strength and calculation results

组 编号	IOT				IOT-P2.0			
	IOT0	IOT20	IOT40	IOT60	IOT0-P2.0	IOT20-P2.0	IOT40-P2.0	IOT60-P2.0
实验值	3.64	3.56	3.79	3.75	4.17	4.25	4.61	4.46
计算值	3.64	3.74	3.8	3.86	4.17	4.28	4.36	4.42
误差范围					-1%~5%			

2.3 立方体抗压强度和四点抗弯强度之间换算指标

众所周知,立方体抗压强度和四点抗弯强度间的关系可以用公式(3)表示。针对抗压强度 f_{cu} 和抗折强度 f_f 之间的关系,许多国家标准和文献提出了各种不同参数 a 和 b 。例如,ACI(318-95)^[12]: $a=0.54$, $b=0.5$;CEB-FIP^[13]: $a=0.81$, $b=0.5$;文献^[14]: $a=0.75$, $b=0.5$ 。因此,本文通过非线性最

小二乘法对立方体抗压强度和四点抗弯强度间的关系进行了拟合,见图3(a)和公式4。最后,本文将实验结果、各国家标准、文献以及公式(4)的计算结果进行对比,见图3(b)和表8。

$$f_f = a \times f_{cu}^b \quad (3)$$

$$f_f = 0.702 \sqrt{f_{cu}} \quad (4)$$

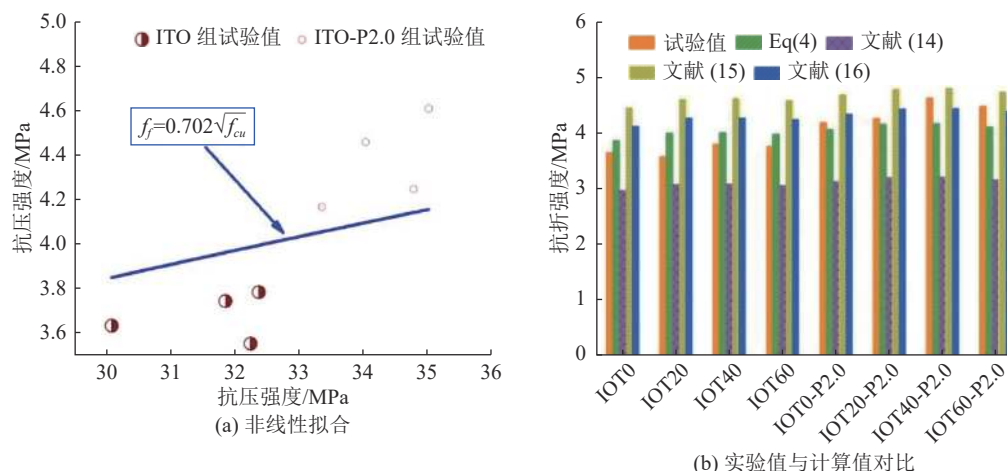


图3 抗压强度与抗折强度关系

Fig.3 Relationship between compressive strength and flexural strength

由3(b)和表8可知,与实验结果相比,ACI(318-95)^[12]所计算出来的结果相比于实验结果偏

小,并且误差范围在-16.1%~ -44.3%。CEB-FIP^[13]和文献^[14]计算出来均高于实验结果,误差范围分

别在 3.8%~22.3%，-1.9%~16.4%。综上可以看出，上述标准和文献计算出来结果与实验结果相差较大，难以适用，而本文通过拟合所得的公式（4）的计算结果与实验结果的误差在-11%~11%，相对较小。

表 8 实验值与计算值间误差				
Table 8 Error between test results and calculation results				
Eq.(4)	ACI(318-95) ^[12]	CEB-FIP ^[13]	文献 ^[14]	
误差 -11%~11%	-16.1%~-44.3%	3.8%~22.3%	-1.9%~16.4%	

2.4 弯曲韧性评价

2.4.1 荷载挠度曲线

图 4 显示了 IOT 组和 IOT-P2.0 的四点抗折荷载-位移曲线。可以看出，对于 IOT 组，超过峰值点后，试件以一条主裂缝贯穿而突然破坏，表现出明显的脆性特征。随着铁尾矿砂取代率增加，相比于 IOT0，IOT20，IOT40 和 IOT60 的峰值荷载所对应位移分别增加了 4.5%、13.78%、10.5%，并且位移值变化范围在 0.2~0.4 mm 之间。而掺入

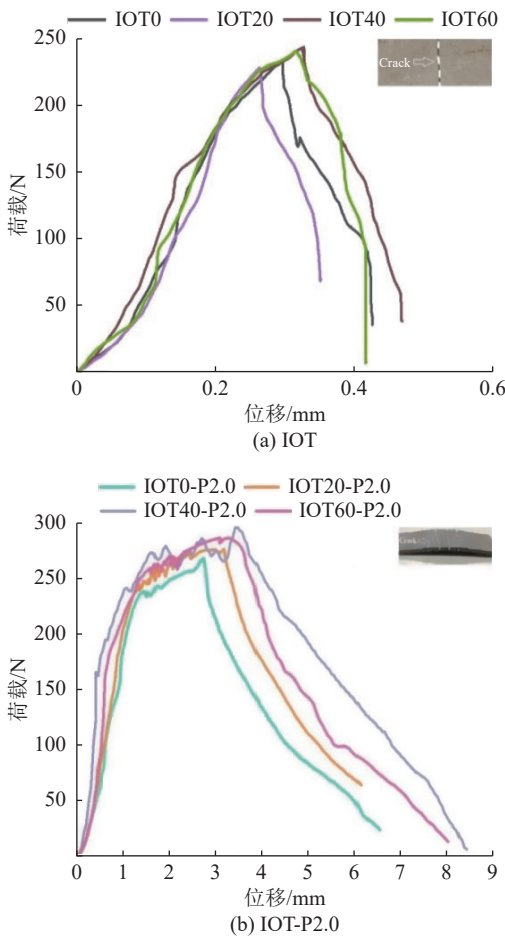


图 4 荷载-位移曲线
Fig.4 Load-deflection curves

纤维的 IOT-P2.0 组，其位移值明显高于 IOT 组，并且承载能力随着位移增加而逐渐增大，裂缝出现不稳定扩展，此时纤维通过与基体的粘结界面传递应力，试件以多条裂缝开展，各曲线表现出应变-硬化行为，韧性破坏特征较为明显。此外，曲线下降段斜率相比于较为平缓。相比于 IOT0-P2.0，IOT20-P2.0，IOT40-P2.0 和 IOT60-P2.0 的峰值荷载所对应位移分别增加了 12.5%、22.9%、15.96%，特别是 IOT40-P2.0，其荷载-位移曲线与坐标轴 X 所围成的面积饱满。

2.4.2 弯曲韧性指数

弯曲韧性也是材料性能的一项重要指标，它对于选定纤维类型和品种、确定纤维掺量、设计实验配合比有着重要意义。目前，关于弯曲韧性评价方法有美国 ASTM C 1018 标准、日本的 JSCE-SF4 标准、欧洲的 RILEM TC 162-TDF 标准和中国的 CECS 13:2009 标准，这些标准从不同角度定义和评价了试件的弯曲韧性。然而，在众多评价方法中，作为基础评价方法的美国 ASTM C 1018 标准，由于其物理意义明确且不受试件尺寸和形状的影响而得到了广泛的应用，因此，本文采用 ASTM C 1018 标准进行韧性指标计算与分析，其结果见表 9。

表 9 韧性指数				
Table 9 Toughness indexes				
组	编号	I_5	I_{10}	I_{20}
IOT	IOT0	2.07	/	/
	IOT20	2.25	/	/
	IOT40	3.58	/	/
	IOT60	2.86	/	/
IOT-P2.0	IOT0-P2.0	5.93	12.35	19.67
	IOT20-P2.0	6.12	13.95	25.89
	IOT40-P2.0	6.68	14.26	27.70
	IOT60-P2.0	5.17	14.22	22.95

其中，弯曲韧性指数 I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 的计算公式为。

$$I_5 = \frac{\Omega_{3.0\delta}}{\Omega_\delta}, I_{10} = \frac{\Omega_{5.5\delta}}{\Omega_\delta}, I_{20} = \frac{\Omega_{10.5\delta}}{\Omega_\delta}$$

式中： δ 为试件初裂点对应的跨中挠度（mm）； Ω_δ 、 $\Omega_{3.0\delta}$ 、 $\Omega_{5.5\delta}$ 、 $\Omega_{10.5\delta}$ 分别是跨中挠度为 δ 、 3.0δ 、 5.5δ 和 10.5δ 时所对应的荷载-挠度曲线下的面积（N·mm）。

从表 9 可以看出，IOT 组的韧性指数只能计算出 I_5 ，并且随着铁尾矿砂取代率的增加，韧性指数

I_5 有所波动。相比于 IOT0, IOT20 和 IOT60, IOT40 的韧性指数 I_5 最大。而对于 IOT-P2.0 组, 韧性指数可以计算到 I_{10} 和 I_{20} , 并且 I_{20} 和 I_5 , I_{10} 差值越来越大。随着铁尾矿砂取代率的增加, 韧性指数 I_5 , I_{10} 和 I_{20} 呈现先增加后减小的趋势, 特别是 IOT40-P2.0 的韧性指数 I_5 , I_{10} 和 I_{20} 均高于 IOT0-P2.0, IOT20-P2.0 和 IOT60-P2.0。从微观角度看, 这主要是因为铁尾矿砂“填充效应”和“火山效应”, 水化反应在基体内部生成大量的 C-S-H 凝胶材料, 这些 C-S-H 凝胶与乱象分布的纤维粘结在一起, 共同受力, 抑制裂缝开展。并且当额外 C-S-H 凝胶越多时, 与纤维的包裹性能就越好, 起到桥联作用和韧性增强效果越明显。

2.5 核磁共振孔隙特征

图 5 显示了 IOT 组和 IOT-P2.0 组中各配合比的水泥基复合材料试样 28 d 的 T_2 谱曲线。可以看出每条 T_2 谱曲线呈现三个信号峰, 包含一个主信号峰（第一峰）和两个次信号峰（第二峰和第三峰），并且主信号峰的信号强度远大于次信号峰，这说明本次实验试样内部微孔数量大于中孔和大孔，基体内部孔隙主要以微孔为主。对比 IOT 组和 IOT-P2.0 组的各 T_2 谱曲线，可以看到，随着铁尾矿砂掺量的增加，各 T_2 谱曲线的第一峰向右偏移，这说明微孔数量占比增加，基体内部中孔和大孔被细化。

此外，根据核磁共振原理， T_2 谱曲线的积分面积反应了试样中的孔隙水的量，两者成正比关系。由表 10 可知，在 IOT 组中，可以看出随着铁尾矿砂掺量的增加，各 T_2 谱曲线峰面积呈现先减小后增加趋势。相比于 IOT0, IOT20, IOT40 和 IOT60 的 T_2 谱曲线峰面积分别减小了 15.31%, 43.62%, 22.4%。这一结果说明，在水泥基复合材料中掺入铁尾矿砂后，铁尾矿砂的“填充效应”和“火山灰

效应”有效的填充和细化了基体内部的孔隙，使基体内部的微观结构更加致密。然而，当铁尾矿砂掺量过高时，会导致骨料集配不合理，基体内部孔隙率增加。这在一定程度上解释了 IOT20, IOT40 和 IOT60 的强度高于 IOT0。对于 IOT-P2.0 组，可以看出，纤维的掺入后进一步细化了基体内部孔隙。例如，相比于 IOT 组，掺入纤维的 IOT-P2.0 组的 T_2 谱曲线峰面积减 21.34%~33.05%，特别是 IOT40-P2.0 的 T_2 谱曲线峰面积最小，这就是 IOT40-P2.0 具有最高强度的原因之一。

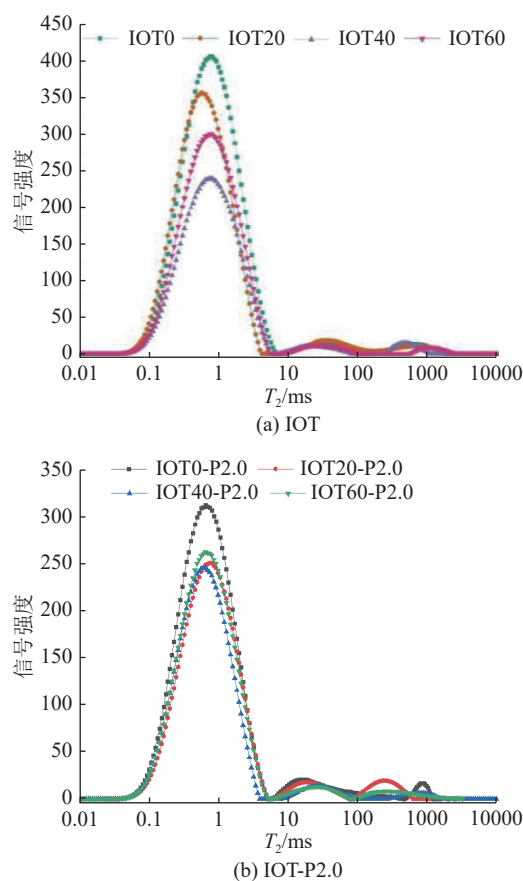


图 5 T_2 曲线

Fig.5 Curves of T_2 spectrum

表 10 峰值面积和信号强度
Table 10 Signal intensity and area of the main peak

组	IOT				IOT-P2.0			
编号	IOT0	IOT20	IOT40	IOT60	IOT0-P2.0	IOT20-P2.0	IOT40-P2.0	IOT60-P2.0
信号强度	406.4	356	240.19	300.29	312.83	251.09	246.18	263.04
面积	14 561.15	12 331.47	8 209.80	11 299.10	9 747.80	7 911.00	6 457.09	9 355.45

3 结 论

(1) 当铁尾矿砂以不同取代率掺入时，立方体抗压强度、抗折强度和轴心抗压强度等力学性

能均有所提升。并且，随着铁尾矿砂取代率的增加，力学性能呈现先增加后减小趋势。对于 IOT-P2.0 组，当 PVA 纤维与铁尾矿砂复合后，试块破坏形态呈现出韧性破坏，并且力学性能进一步提

升,特别是 IOT40-P2.0 展现出较好的力学性能。

(2) 基于实验数据,分别建立了铁尾矿砂取代率与抗压强度和抗折强度之间关系,通过对比计算值与实验值,发现误差较小。此外,提出了立方体抗压强度与抗折强度计算公式,确定了一些常数。

(3) 随着铁尾矿砂掺量的增加, IOT20, IOT40 和 IOT60 基体内部孔隙小于 IOT0。相比于 IOT 组, PVA 纤维与铁尾矿砂复合的 IOT-P2.0 组的基体内部孔隙进一步减小,特别是 IOT40-P2.0 的 T2 谱曲线峰面积最小,基体密实性较好。因此,通过综合考虑,当铁尾矿砂取代率为 40% 与 PVA 纤维结合 (IOT40-P2.0),混合物拥有良好的力学性能。

参考文献:

- [1] YANG G, DENG Y, WANG J. Non-hydrothermal synthesis and characterization of MCM-41 mesoporous materials from iron ore tailing[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(5):7401-7406.
- [2] 王海军, 王伊杰, 李文超, 等. 全国矿产资源节约与综合利用报告 (2019)[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(2):2.
- WANG H J, WANG Y J, LI W C, et al. The report of mineral resources saving & comprehensive utilization in China(2019)[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2020, 33(2):2.
- [3] HUANG X, RANADE R, LI V C. Feasibility study of developing green ecc using iron ore tailings powder as cement replacement[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(7):923-931.
- [4] 南晓杰, 王帅, 刘立伟, 等. 利用焙烧铁尾矿制备透水砖的水化特征研究[J]. 金属矿山, 2021(8):208-213.
- NAN X J, WANG S, LIU L W, et al. Study on hydration characteristics of permeable brick prepared from roasted iron tailings[J]. *Metal Mine*, 2021(8):208-213.
- [5] 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.
- [6] 刘玉林, 刘长森, 刘红召, 等. 我国矿山尾矿利用技术及开发利用建议[J]. 矿产保护与利用, 2018(6):140-144.
- LIU Y L, LIU C M, LIU H Z, et al. Utilization technology and development and utilization of mine tailings in china[J]. *Mineral Protection and Utilization*, 2018(6):140-144.
- [7] 冯卡, 王馨语. 硫铁矿尾矿矿渣改良混凝土力学性质与耐久性研究[J]. 矿产综合利用, 2022(3):6-11.
- FENG K, WANG X Y. Study on mechanical properties and durability of improved concrete with pyrite tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(3):6-11.
- [8] Kuranchie F A, Shukla S K, Habibi D, et al. Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete[J]. *Cogent Engineering*, 2015, 2(1):1083137.
- [9] Shettima A U, Hussin M W, Ahmad Y, et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120(sep.1):72-79.
- [10] 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 tailing ore concrete[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4): 159-164.
- [11] TANG K, MAO X S, TANG X L. Study on application of iron tailings fine aggregate in concrete[P]. *Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Advances in Materials, Mechatronics and Civil Engineering (ICAMMCE 2018)*, 2018.
- [12] 张少峰, 王雪. PVA 纤维尾矿砂水泥基复合材料断裂能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2017(5):77-80.
- ZHANG S F, WANG X. Experimental study on fracture energy of PVA fiber tailings cement-based composite[J]. *New Building Materials*, 2017(5):77-80.
- [13] 鲍文博, 张少峰. 尾矿砂 PVA 水泥基复合材料抗压和抗弯性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(10):85-88.
- BAO W B, ZHANG S F. Experimental study on compressive and Flexural Properties of tailings PVA cement-based Composites[J]. *Concrete and Cement Products*, 2015(10):85-88.
- [14] BAO W B, WANG C H, ZHANG S F, et al. Experimental study on mechanical properties of PVA fiber reinforced tailings cementitious composites[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 598:618-621.

Mechanical Properties and Pore Structure of Fiber Reinforced Iron Tailings Cement-based Materials

ZHANG Haijun, LI Tao, ZHAN Meng

(College of Construction Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, Henan, China)

Abstract: This is an article in the field of ceramics and composites. In this article, the effects of IOT and polyvinyl alcohol (PVA) fiber (PF) on the compressive strength, four-point flexural strength, flexural toughness, pore structure of cement-based composites were studied and discussed in detail. The conversion relationship between compressive strength and four-point flexural strength was established. The results showed that the incorporation of IOT had an enhanced effect on the mechanical properties, and this enhanced effect showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase in the substitution rate of IOT. However, when PF was added, the mechanical properties under the combined effect of PF and IOT were further improved and showed good toughness. In addition, the internal pores of the matrix with IOT substitution rate of 40% and PF were obviously reduced. Thus, it was concluded that the cement-based composite material had good mechanical properties when the 40% IOT was combined with PF.

Keywords: Ceramics and composites; Polyvinyl alcohol fiber; Iron ore tailing; Mechanical properties; Pore structure

////////////////////////////////////
(上接第 152 页)

Effect of Mechanical Force on Activation Characteristics of a Low-grade Ascharite Ore

CHAO Qingyang, SHI Peiyang, LIU Yuzhe, LIU Chengjun

(Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. In this article, SEM-EDS, XRD, FT-IR, laser particle size analysis and other means were used to characterize the mechanical activation of boron and magnesium ore powder. The results show that the crystal structure of boraxite changes at the action of mechanical force from the regular and orderly crystal structure to the disorder of the amorphous structure. The particle size distribution of the ore powder is greatly affected by the mechanical force. At the experimental conditions of 200 r/min speed of the ball mill and the ratio of ball to material of 10:1, the optimal activation time is 6 h, when the particle size of 90% of the ore powder is less than 21.5 μm . The activity of ascharite is related to the number of active bonds after activation. In a certain activation time, the activity of ascharite increases with increasing activation time, but the agglomeration of mineral powder particles at the action of van der Waals force for a long activation time leads to a decrease in activity. The mechanical activation pretreatment can reduce the dependence on sulfuric acid concentration and temperature in the leaching reaction of ascharite, and significantly improve the leaching rate of elements in ascharite. The experiments show that the leaching rate of ascharite after activation for 6 h is 50% higher than that of the raw ascharite under the condition of reaction temperature 25 $^{\circ}\text{C}$ and sulfuric acid concentration 1.48 mol/L. And amorphous SiO_2 can be prepared at friendly conditions. The apparent activation energy decreases from 23.54 kJ/mol to 9.41 kJ/mol after activation. The diffusion of the solid product layer during the leaching process is the limiting link which affects the reaction of ascharite with sulfuric acid.

Keywords: Mining engineering; Low-grade ascharite; Mechanical activation; Particle size distribution; Activation energy