

麦秸纤维与牡蛎壳对泡沫混凝土力学性能的影响

王林富¹, 吕子云², 李春宝², 綦连明³

(1. 中国石油大学 青岛软件学院建设办公室, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 3. 东营市自然资源和规划局垦利分局, 山东 东营 257500)

摘要:为开发一种新型绿色低碳、碱性弱的混凝土人工鱼礁材料,本研究在泡沫混凝土基础上掺入农业废弃物麦秸纤维和牡蛎壳,通过混凝土性能测试以及扫描电镜研究了两种材料对人工鱼礁用泡沫混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的影响,二者掺量占胶凝材料总质量百分比分别为0.05%~0.25%和5%~25%。并以发泡剂稀释倍数、麦秸纤维掺量、牡蛎壳掺量作为影响因素,建立了抗压强度和劈裂抗拉强度二次多项式回归模型。结果表明:随麦秸纤维掺量的增加,泡沫混凝土力学性能先增强后减弱,最优掺量为0.15%;随牡蛎壳掺量的增加,泡沫混凝土力学性能先增强后减弱,最优掺量为15%;适量复掺麦秸纤维和牡蛎壳细骨料可以改善泡沫混凝土的力学性能,当牡蛎壳掺量15%、麦秸纤维掺量0.2%时泡沫混凝土力学性能最优且比单掺任一种材料效果更好。根据回归模型的优化结果得到3个影响因素的最优值:发泡剂稀释倍数38.60、麦秸纤维掺量0.15%、牡蛎壳掺量14.76%。

关键词:泡沫混凝土;麦秸纤维;牡蛎壳;抗压强度;劈裂抗拉强度

中图分类号:TU528.2

文献标志码:A

Effect of wheat straw fiber and oyster shell on mechanical properties of foam concrete

WANG Linfu¹, LÜ Ziyun², LI Chunbao², QI Lianming³

(1. Qingdao Institute of Software Developing Office, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3. Dongying Municipal Bureau of Natural Resources and Planning Kenli Branch, Dongying 257500, China)

Abstract: To develop a novel green, low-carbon and weak-alkaline concrete artificial reef material, this study added wheat straw fiber and oyster shell into the foam concrete and investigated the effects of the two materials on the compressive strength and splitting tensile strength of the foam concrete for artificial reef through concrete performance testing and electron microscope scanning. The percentages of the two materials in the total mass of the cementitious material were 0.05%~0.25% and 5%~25%, respectively. A quadratic polynomial regression model of compressive strength and splitting tensile strength was established with the dilution ratio of foaming agent, the content of wheat straw fiber and the content of oyster shell as the influencing factors. The results show that with the increase of wheat straw fiber content, the mechanical properties of the foam concrete first increase and then decrease and the optimal content is 0.15%, while with the increase of oyster shell content, the mechanical properties of foam concrete first increase and then decrease and the optimal content was 15%. Appropriate amount of wheat straw fiber and oyster shell fine aggregate can improve the mechanical properties of foam concrete. When the oyster shell content is 15% and the wheat straw fiber content is 0.2%, the mechanical properties of the foam concrete are the best and the effect is better than that of a single material. The

收稿日期:2025-06-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2603000)

作者简介:王林富(1986—),男,山东青州人,硕士,主要从事再生混凝土、高教管理方面的研究。

李春宝(1980—),男,黑龙江尚志人,教授,博士,主要从事人工环境降碳技术与管理、能源基础设施优化与防灾减灾、结构工程、岩土工程领域的研究,本文通信作者。E-mail:20070048@upc.edu.cn

optimization results of the regression model yielded the optimal values of the three influencing factors as follows: the dilution ratio of foaming agent of 38.60 times, the content of wheat straw fiber of 0.15%, and the content of oyster shell of 14.76%.

Key words: foam concrete; wheat straw fiber; oyster shell; compressive strength; splitting tensile strength

人工鱼礁作为海洋牧场的核心基础设施,对修复海洋生态环境、增殖渔业资源具有重要意义^[1]。混凝土在海洋环境中化学性质较稳定、强度高,能制成各种形状、可塑性强,还能利用废弃资源,目前是世界范围内使用最广泛的人工鱼礁材料^[2-3]。传统水泥混凝土人工鱼礁存在碱性强、海洋环境相容性差、耐久性不足等问题,限制了其生态效益的发挥。而泡沫混凝土的多孔结构、碱性较低等特性有利于提高生物附着性,有效改善人工鱼礁的增殖效果。

已有研究^[4-6]表明在混凝土中掺入纤维可以改善其物理性能和力学特性。同时,我国农作物秸秆资源丰富,但只有约30%的秸秆被用于养殖业和工业,剩余的秸秆得不到充分利用。秸秆处理不仅造成了秸秆资源的极大浪费,而且会加剧大气污染,与我国的“双碳”目标背道而驰。因此,探寻秸秆利用新途径已成必然趋势。王秀丽等^[7]研究发现,随着稻草纤维掺量的增加,泡沫混凝土的抗压强度先增大后减小;李超飞等^[8]通过研究稻草纤维对混凝土工作性能和力学性能的影响,为稻草纤维在混凝土材料中的资源化利用提供了理论依据。同时,秸秆纤维具有较高的碳元素含量,在混凝土人工鱼礁中添加秸秆,可以将秸秆中的生物质碳固定在鱼礁中从而实现协同固碳。

生产泡沫混凝土对砂石的需求量较大,天然砂过度开采导致河床下切与行洪安全隐患,石材开采则加剧山体失稳及水土流失^[9]。我国作为全球贝类养殖大国,目前贝类壳体利用率较低。大量废弃贝壳被堆积在沿海区域,会引发环境污染及病菌滋生。基于此,将贝壳加工为再生骨料替代天然砂石的创新方案,有着固废消纳与资源替代的双重价值。Kuo等^[10]利用牡蛎壳代替混凝土中的部分天然砂,发现当替代率为5%时,混凝土的抗压强度良好;Wang等^[11]研究发现粉煤灰-牡蛎壳复合掺合料等量代替混凝土中的天然砂,可以显著提高混凝土的力学性能;Kong等^[12]研究发现废弃牡蛎壳和再生骨料的添加能够降低混凝土碱度,有利于提高人工鱼礁的生物亲和性。

此外还有一些学者对于秸秆和牡蛎壳在混凝土中的应用可行性进行了验证^[13-14],但截至目前尚未有同时添加秸秆纤维和牡蛎壳情况下,不同复合掺量对泡沫混凝土力学性能影响的试验研究以及模型分析。因此本研究以绿色低碳理念为导向,提出一种基于固废资源化利用的新型人工鱼礁用泡沫混凝土材料,在泡沫混凝土基础上单独和复合添加麦秸纤维和牡蛎壳细骨料,通过试验以及回归模型研究3种情况对泡沫混凝土力学性能的影响。因其具有绿色低碳、固废资源化利用、力学性能良好等特性,还可用于地下工程、市政工程、机场跑道、石油管道等各类回填工程。

1 试验

1.1 试验原材料

山东省青岛市伟东宏远建材提供的P·O 42.5普通硅酸盐水泥;巩义市铂润耐火材料有限公司提供的一级粉煤灰,其化学成分如表1所示;聚羧酸高效减水剂;植物蛋白发泡剂。

根据文献^[15],本研究选取麦秸纤维的长度为2~10 mm,为去除麦秸纤维表面果胶、蜡质等杂质对水泥水化的影响,将麦秸纤维用浓度为4%的NaOH溶液浸泡处理18 h后过滤、清洗并烘干。

小颗粒规格的牡蛎壳可以更好地改善混凝土的力学性能,因此选用青岛本地的牡蛎壳,经清洗、烘干、破碎、筛分等处理得到粒径1~3 mm的细颗粒。

1.2 试验方案及方法

1.2.1 试验方案

1) 单因素试验方案。基础配比为:以胶凝材料总质量为基准,水泥占70%、粉煤灰占30%、水胶比0.3、减水剂掺量为胶凝材料

表1 粉煤灰主要化学成分

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO
含量	57.35	22.58	5.76	3.52	2.98	1.45

总质量的0.5%。X1~X5组试验单掺麦秸纤维,麦秸纤维掺量占胶凝材料总质量百分比分别为0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.25%。M1~M5组试验单掺牡蛎壳细骨料,牡蛎壳掺量占胶凝材料总质量百分比分别为5%、10%、15%、20%、25%。

2) 复掺试验方案。为研究麦秸纤维和牡蛎壳细骨料对泡沫混凝土力学性能的复合影响,设计两种因素的复掺试验,根据单掺试验结果分析,设计X2M2、X3M2、X4M2、X4M3、X4M4 5组试验。

3) 响应面优化试验方案。以发泡剂稀释倍数(A)、麦秸纤维掺量(B)、牡蛎壳掺量(C)作为试验的3个因素,发泡剂稀释倍数的水平为30、40、50倍,麦秸纤维掺量的水平为胶凝材料总质量的0.10%、0.15%、0.20%,牡蛎壳掺量的水平为胶凝材料总质量的10%、15%、20%。以28 d抗压强度、28 d劈裂抗拉强度作为模型响应值,设计试验17组,试验设计方案与试验结果如表2所示。

表2 响应面优化试验方案与结果

Table 2 Response surface optimization experimental design and results

组别	发泡剂稀释倍数	麦秸纤维掺量/%	牡蛎壳掺量/%	抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa
1	30	0.20	15	35.97	3.54
2	40	0.10	10	32.55	3.09
3	40	0.15	15	38.01	3.83
4	50	0.20	15	35.90	3.53
5	40	0.20	10	35.20	3.59
6	50	0.15	20	35.37	3.64
7	40	0.15	15	37.80	3.79
8	40	0.15	15	37.91	3.81
9	30	0.15	10	34.65	3.43
10	30	0.15	20	35.50	3.49
11	30	0.10	15	35.47	3.32
12	50	0.10	15	35.78	3.47
13	40	0.20	20	33.22	3.31
14	50	0.15	10	34.89	3.42
15	40	0.15	15	38.21	3.74
16	40	0.10	20	35.41	3.65
17	40	0.15	15	38.13	3.77

1.2.2 试验方法

1) 试块制备。将水泥和粉煤灰加入搅拌机,搅拌2~3 min至均匀,再将减水剂完全溶于拌合水并充分搅拌,然后加入搅拌均匀的胶凝材料中,再搅拌2 min左右。同时将按照既定稀释倍数稀释好的含有发泡剂的拌合水用空气压缩型发泡机发泡并采集泡沫,加入正在工作的搅拌机中继续搅拌2 min,停止搅拌后将均匀拌合的料浆倒入模具中刮平并覆膜保护,静置24 h后拆除模具,放置在标准养护箱中养护至规定龄期,将试件表面擦净,进行性能测试。

2) 试块性能测试。参照GB/T 43487—2023《泡沫混凝土及制品试验方法》^[16]对泡沫混凝土进行抗压强度测试。每组配合比各制备两组100 mm×100 mm×100 mm的三联模,分别测试试块7 d、28 d的抗压强度值。劈裂抗拉强度按照GB/T 29417—2012《水泥砂浆和混凝土干燥收缩开裂性能试验方法》^[17]进行测试,分别测试试块7 d、28 d的劈裂抗拉强度值。使用德国ZEISS Sigma 300扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对长和宽均在10~20 mm,厚度不超过15 mm的样本进行形貌拍摄,加速电压为3 kV,探测器为SE2二次电子探测器。

2 试验结果与讨论

2.1 麦秸纤维对泡沫混凝土力学性能的影响

不同纤维掺量组的扫描电镜分析结果如图 1 所示,试验得到不同麦秸纤维掺量下泡沫混凝土 7 d、28 d 抗压强度和劈裂抗拉强度的变化规律如图 2、图 3 所示。

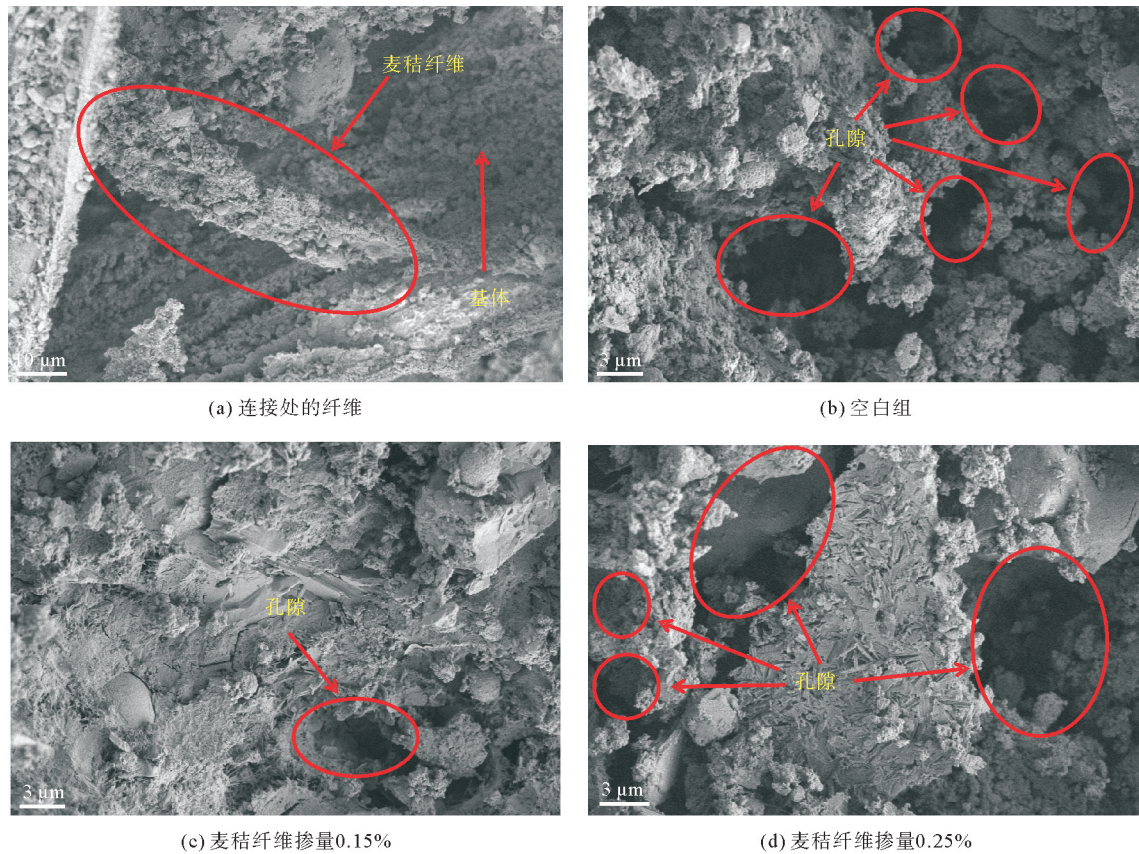


图 1 不同纤维掺量组扫描电镜结果

Fig. 1 Scanning electron microscope results of different fiber content groups

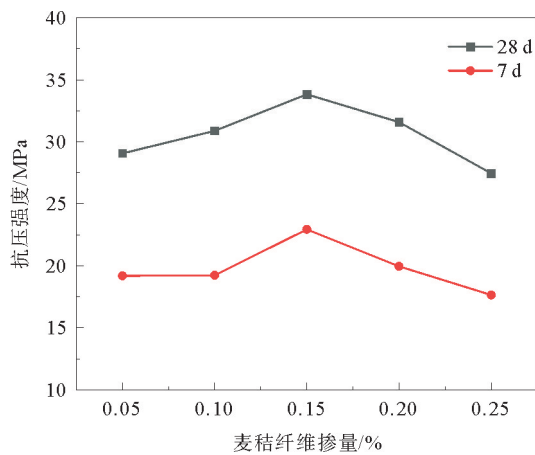


图 2 麦秸纤维掺量对抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of wheat straw fiber dosage on compressive strength

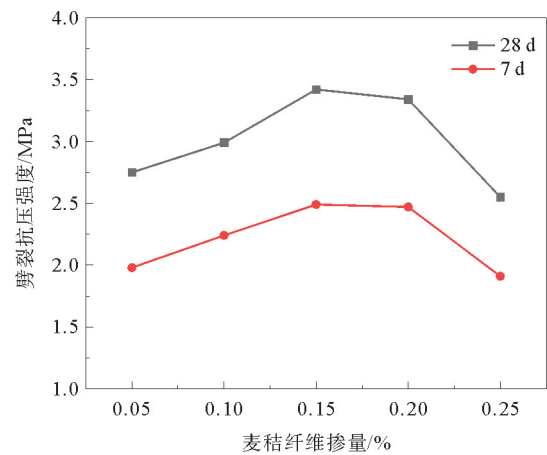


图 3 麦秸纤维掺量对劈裂抗拉强度的影响

Fig. 3 Effect of wheat straw fiber dosage on splitting tensile strength

从图 2 可以看出,随着麦秸纤维掺量的增加,泡沫混凝土抗压强度呈现先增后减的趋势。麦秸纤维掺量为 0.15% 时,7 d、28 d 抗压强度均达到试验组中的最大值,分别为 22.94 和 33.83 MPa,其中 28 d 抗压强度与空白组 28 d 抗压强度 28.53 MPa 相比提高了 18.58%。

图 3 数据显示,随着麦秸纤维掺量的增加,劈裂抗拉强度呈现先增后减的规律,峰值强度对应 0.15% 的掺量,此时 7 d、28 d 劈裂抗拉强度呈现双高值,分别为 2.49 和 3.42 MPa,其中 28 d 劈裂抗拉强度峰值和空白组 28 d 劈裂抗拉强度峰值 2.76 MPa 相比提高了 23.91%。

结合强度试验结果和扫描电镜结果可以得出,与空白组相比,麦秸纤维掺量在 0.10%~0.20% 的泡沫混凝土的力学性能均有所改善,当麦秸纤维掺量达到 0.25% 时,泡沫混凝土力学性能开始变差。这是因为:①麦秸纤维经碱处理后表面粗糙度增加,与水泥基体的机械咬合作用增强,提高了界面粘结强度;②当泡沫混凝土受到外力作用时,麦秸纤维会通过桥接微裂缝、发生自身拉伸与拔出等行为,分散和吸收能量,延缓应力集中,抑制裂缝扩展;③基体和纤维弹性模量相差较大,在受力过程中两者会产生相对位移或相对位移趋势,产生一定的摩擦力,可以抵抗部分变形从而提高泡沫混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度。此外,如图 1(a)所示,麦秸纤维在泡沫混凝土破坏过程中起到拉结作用,能够有效延缓宏观裂缝的形成与扩展,增强材料的韧性和破坏后的完整性。但如果纤维掺量过多,纤维会出现图 1(d)中的结团现象,纤维和基体之间的粘结性降低,破坏泡沫混凝土的结构,从而破坏整体稳定性,使得泡沫混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度降低。

2.2 牡蛎壳细骨料对泡沫混凝土力学性能的影响

试验得到不同牡蛎壳掺量下泡沫混凝土 7 d、28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度的变化规律如图 4、图 5 所示,不同牡蛎壳掺量组扫描电镜结果如图 6 所示。

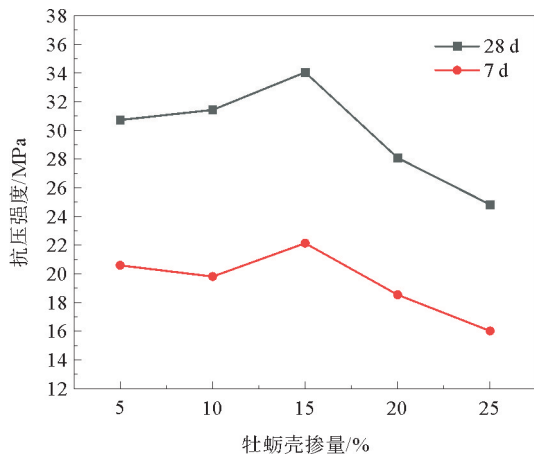


图 4 牡蛎壳掺量对抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of oyster shell dosage on compressive strength

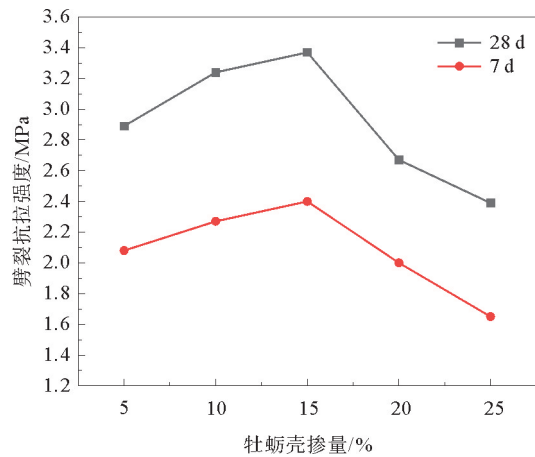


图 5 牡蛎壳掺量对劈裂抗拉强度的影响

Fig. 5 Effect of oyster shell dosage on splitting tensile strength

图 4 试验数据表明,泡沫混凝土的抗压强度与牡蛎壳掺量呈现显著的二次函数关系。当掺量为 15% 时,试块在 7 d、28 d 养护龄期下的抗压强度分别达到 22.14 和 34.06 MPa 的极值点,验证了最优掺量阈值的存在。与空白组 28 d 抗压强度峰值 28.53 MPa 相比,28 d 抗压强度峰值提高了 19.38%。

图 5 试验数据显示,随着牡蛎壳细骨料掺量的增加,泡沫混凝土劈裂抗拉强度呈现先增后减的二次函数关系。当牡蛎壳掺量为 15% 时,7 d、28 d 劈裂抗拉强度达到试验组中的最大值,分别为 2.52 和 3.37 MPa,与空白组 28 d 劈裂抗拉强度 2.76 MPa 相比,28 d 劈裂抗拉强度提高了 22.10%。

结合图 4~5 结果和图 6 扫描电镜结果可以得出:牡蛎壳掺量在 5%~15% 的泡沫混凝土的力学性能有所改善,当牡蛎壳掺量超过 20% 时,泡沫混凝土力学性能逐渐变差。这是因为:牡蛎壳细骨料的掺入显著优化了泡沫混凝土的微观结构与孔隙特征。一方面,牡蛎壳颗粒本身具有一定刚性,可作为微集料有效填充基体中的宏观孔隙;另一方面,从图 6(a)可见,其表面附着大量纤维状水化硅酸钙凝胶和针状钙矾石

晶体,这些水化产物在界面处交织生长,形成致密的过渡区,增强了骨料与水泥浆体的粘结性能,并且大量纤维状的水化硅酸钙凝胶可在内部孔隙起到支撑作用。由图 6(b)和图 6(c)对比可以看出,适量添加牡蛎壳细骨料后,试件的孔隙结构更为致密,说明牡蛎壳细骨料的添加能够填充部分孔隙,优化孔结构,从而提高泡沫混凝土的力学性能。此外,牡蛎壳中所含的碳酸钙还可与水泥中铝相水化物发生反应促进碳铝酸盐生成,在一定程度上提升基体密度与力学性能。但从图 6(d)中可以看出,当牡蛎壳细骨料掺量过多时易导致局部应力集中和微裂缝产生,反而不利于力学性能的提高。

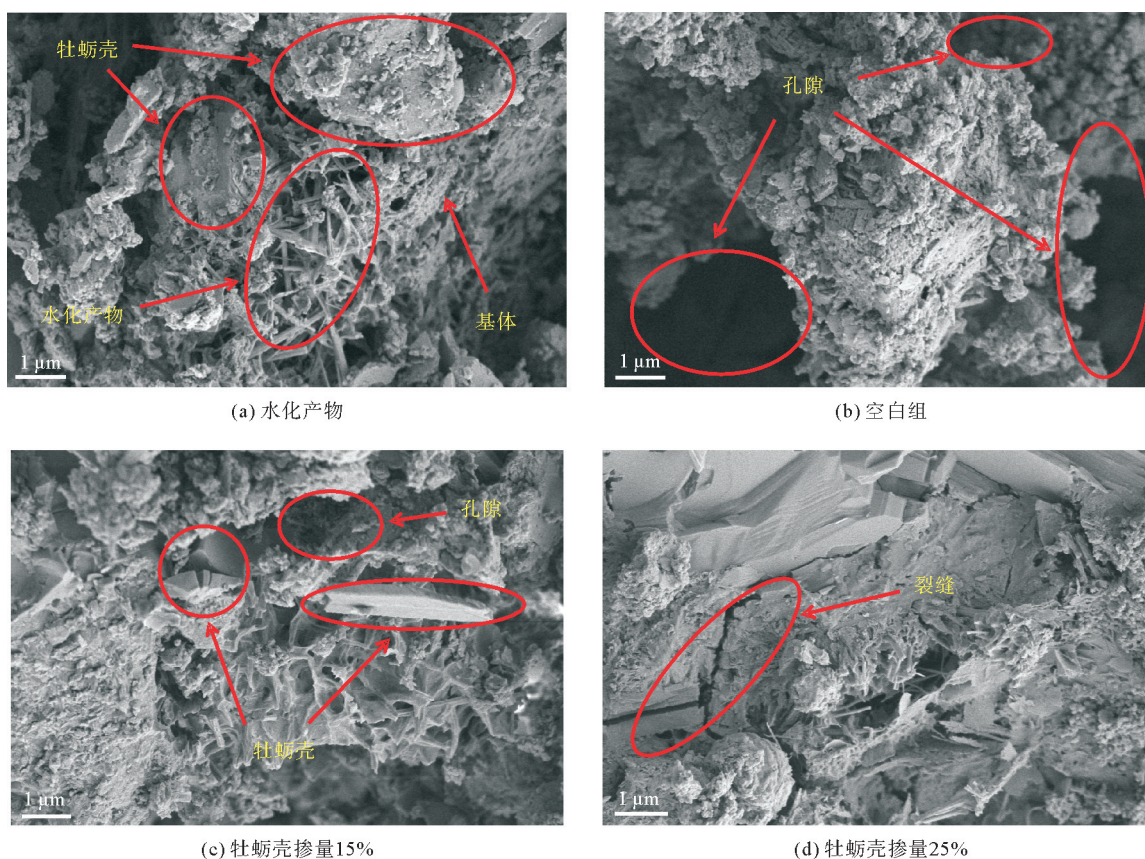


图 6 不同牡蛎壳掺量组扫描电子显微镜结果

Fig. 6 Scanning electron microscope results of different oyster shell content groups

2.3 麦秸纤维和牡蛎壳细骨料对泡沫混凝土力学性能的复合影响

试验得到不同麦秸纤维和牡蛎壳细骨料掺量下泡沫混凝土 28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度的变化规律如图 7、图 8 所示。

图 7 数据显示,在牡蛎壳细骨料掺量固定为 10% 的条件下,泡沫混凝土的抗压强度随麦秸纤维掺量的增加呈现非线性响应,具体表现为阈值依赖性强化效应。当麦秸纤维掺量达到 0.15% 时,抗压强度取得极值,此后随掺量上升呈劣化趋势。此时,泡沫混凝土抗压强度极值为 33.21 MPa,与 X2M2、X4M2 两组试验结果相比,28 d 抗压强度分别提高了 6.9%、1.8%,与空白组相比泡沫混凝土 28 d 抗压强度提高了 16.4%。当麦秸纤维掺量固定为 0.20% 时,泡沫混凝土的抗压强度随牡蛎壳细骨料掺量的增加呈现先增大后减小的趋势。牡蛎壳掺量为 15% 时达到强度极值 35.98 MPa,与 X4M2、X4M4 两组试验结果相比,28 d 抗压强度分别提高了 10.3%、30.6%,与空白组相比泡沫混凝土 28 d 抗压强度提高了 26.1%。

从图 8 可以看出,当牡蛎壳细骨料掺量为 10% 时,随着麦秸纤维掺量的增加,泡沫混凝土的劈裂抗拉强度逐渐增大。当麦秸纤维掺量为 0.20% 时,泡沫混凝土劈裂抗拉强度最大为 3.37 MPa,与 X2M2、X3M2 两组试验结果相比,28 d 劈裂抗拉强度分别提高了 7.7%、1.8%,与空白组相比泡沫混凝土 28 d 劈裂抗拉强度提高了 22.1%。当麦秸纤维掺量为 0.20% 时,随着牡蛎壳细骨料掺量的增加,泡沫混凝土的

抗压强度先增大后减小,当牡蛎壳掺量为 15%时,泡沫混凝土劈裂抗拉强度最大为 3.43 MPa,与 X4M2、X4M4 两组试验结果相比,28 d 劈裂抗拉强度分别提高了 1.9%、25.7%,与空白组相比泡沫混凝土 28 d 劈裂抗拉强度提高了 24.4%。

根据试验结果可以得出,复掺组中 X4M3 组抗压强度和劈裂抗拉强度均为最优,并且与单掺试验中最优组 X3 和 M3 相比,力学性能更加优异。可以说明牡蛎壳细骨料的填充作用和麦秸纤维的微锚固作用可以协同提高泡沫混凝土的力学性能,并且比单掺任一种材料时的效果更好。

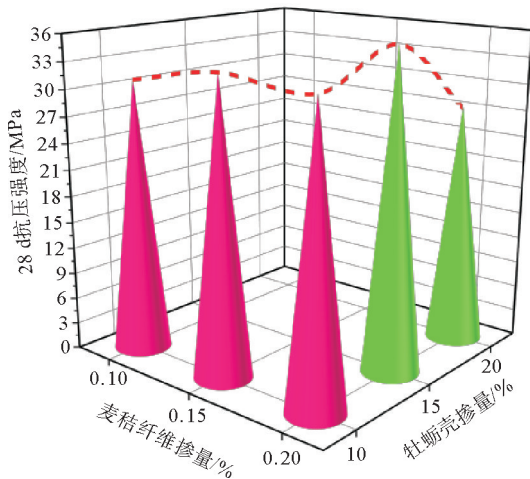


图 7 不同复合掺量对抗压强度的影响

Fig. 7 Effect of different compound dosages on compressive strength

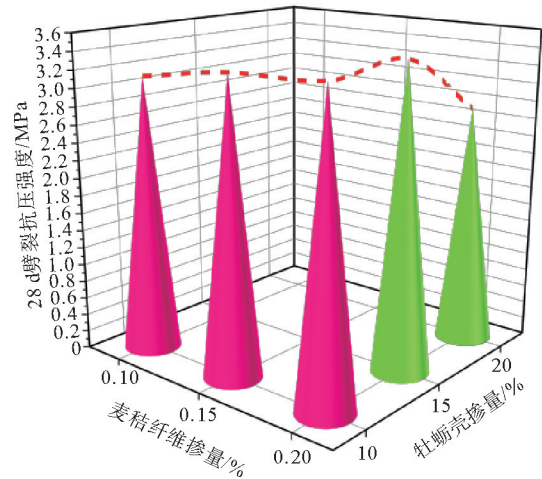


图 8 不同复合掺量对劈裂抗拉强度的影响

Fig. 8 Effect of different compound dosages on splitting tensile strength

3 响应面法优化设计

3.1 模型建立与显著性分析

利用 Design-Expert 软件对试验数据进行处理分析得到抗压强度、劈裂抗拉强度回归方程分别为式(1)和式(2)。

$$Y_1 = 38.01 + 0.0437A + 0.1350B + 0.2762C - 0.0950AB - 0.0925AC - 1.21BC - 0.6122A^2 - 1.62B^2 - 2.30C^2, \tag{1}$$

$$Y_2 = 3.79 + 0.0350A + 0.0550B + 0.0700C - 0.0400AB + 0.0400AC - 0.2100BC - 0.1190A^2 - 0.2040B^2 - 0.1740C^2. \tag{2}$$

式中: Y_1 为抗压强度,MPa; Y_2 为劈裂抗拉强度,MPa; A 为发泡剂稀释倍数; B 为麦秸纤维掺量,%; C 为牡蛎壳掺量,%。

28 d 抗压强度和劈裂抗拉强度模型 P 值均小于 0.000 1,表明模型均是显著的。决定系数越大表明模型的拟合效果越好;校正决定系数和预测决定系数的差值小于 0.2 时表明模型有较好的解释性;信噪比越高表明试验设计的可控性越强,结果可靠性越高,当信噪比大于 4 时模型合理;变异系数可反映模型的变异程度,变异系数越低模型预测偏差越小,当变异系数小于 10%时试验结果可靠^[18]。28 d 抗压强度和劈裂抗拉强度决定系数分别为 0.996 9、0.990 1,校正决定系数分别为 0.992 9、0.977 3,预测决定系数分别为 0.985 3、0.945 7,变异系数分别为 0.392 9%、0.869 2%,信噪比分别为 51.224 1、30.093 6。回归模型的拟合数据均符合要求,表明模型拟合精度高,可靠性强。

3.2 响应面分析

28 d 抗压强度模型中因素 A 、 B 、 C 对应 P 值分别为 0.409 2、0.030 3、0.000 9;28 d 劈裂抗拉强度模型中因素 A 、 B 、 C 对应 P 值分别为 0.015 0、0.001 5、0.000 4。 P 值越小表明影响越显著,由此可以看出

各个因素对泡沫混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的影响程度,同样可以在响应曲面及等高线分布图中得到验证。

以抗压强度为例,如图9所示,随着曲面图颜色由蓝色到红色渐变,抗压强度逐渐增大,根据三维曲面图的变化幅度以及等高线分布的疏密程度可以看出,麦秸纤维掺量和牡蛎壳掺量对泡沫混凝土抗压强度影响更为显著,3个影响因素对泡沫混凝土抗压强度的影响程度排序均为:牡蛎壳掺量(C)>麦秸纤维掺量(B)>发泡剂稀释倍数(A)。结果表明合理的麦秸纤维掺量和牡蛎壳掺量可以改善泡沫混凝土的力学性能。

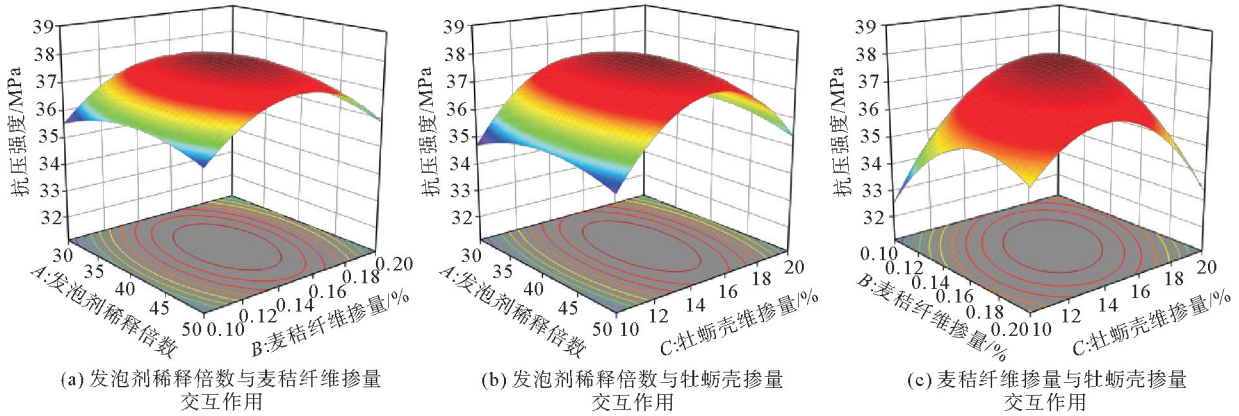


图9 抗压强度三维响应曲面图

Fig. 9 3D response surface plots of compressive strength

3.3 配合比优化及验证

基于回归模型的多目标优化,以28 d抗压强度、28 d劈裂抗拉强度为优化的目标,以发泡剂稀释倍数、麦秸纤维掺量、牡蛎壳掺量为影响变量,泡沫混凝土响应面优化设计目标如表3所示。

经过优化后,得到3种因素的最优值为:发泡剂稀释倍数为38.60,麦秸纤维掺量0.15%,牡蛎壳掺量14.76%。预测结果与试验结果对比如表4所示。由表4可知,28 d抗压强度预测值与实际值之间的误差为3.4%,28 d劈裂抗拉强度预测值与实际值之间的误差为3.2%。各项优化目标的误差均不超过5%,表明模型预测可靠。

表3 响应面优化设计目标

Table 3 Design objective of response surface optimization

因素	目标	最小限制	最大限制
发泡剂稀释倍数(A)	范围内	30	50
麦秸纤维掺量(B)/%	范围内	0.1	0.2
牡蛎壳掺量(C)/%	范围内	10	20
28 d 抗压强度/MPa	最大值	32.55	38.21
28 d 劈裂抗拉强度/MPa	最大值	3.09	3.83

表4 响应面优化预测结果与实际结果

Table 4 Predicted and actual results of response surface optimization

名称	28 d 抗压强度	28 d 劈裂抗拉强度
预测值	37.97	3.78
实际值	36.67	3.66

4 结论

1) 适量麦秸纤维可通过提高界面粘结强度、分散应力、产生界面摩擦力及开裂时的拉结作用改善泡沫混凝土的力学性能,当掺量在0.05%~0.25%时,随掺量的增加其抗压强度和劈裂抗拉强度均呈先升后降趋势,当掺量为0.15%时力学性能达到最优。而当掺量超过0.25%时,纤维易发生结团现象,破坏基体结构完整性,导致力学性能显著下降。

2) 当牡蛎壳掺量在5%~25%时,其抗压强度和劈裂抗拉强度均随掺量增加先增大后减小,掺量15%时表现最佳,这主要是因为牡蛎壳可填充基体内部孔隙,且其表面可附着水化硅酸钙凝胶等水化产

物,形成更致密的结构。但掺量超过20%时,过量骨料易引发界面裂缝,削弱结构整体性,从而使泡沫混凝土力学性能显著下降。

3) 麦秸纤维与牡蛎壳细骨料复掺存在协同增强效应,且效果优于单掺任一种材料。当牡蛎壳掺量15%、麦秸纤维掺量0.20%时,力学性能最优。与空白组相比,28 d抗压强度提升了26.1%,28 d劈裂抗拉强度提升了24.4%,且力学性能显著优于单掺最优组。

4) 基于响应面法以发泡剂稀释倍数、麦秸纤维掺量、牡蛎壳掺量为变量构建的二次多项式回归模型,其抗压强度与劈裂抗拉强度模型 P 值均小于0.0001,决定系数分别为0.9969、0.9901,且预测值与实际值误差均小于5%,表明模型可靠性高。同时优化得到3种因素的最优值为:发泡剂稀释倍数38.60,麦秸纤维掺量0.15%,牡蛎壳掺量14.76%。研究结果为生态友好型人工鱼礁材料的开发提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 于定勇,陈雅林,李忠勤,等.增设倾斜侧板的新型人工鱼礁体流场效应研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2025,55(增1):55-68.
YU Dingyong, CHEN Yalin, LI Zhongqin, et al. Study on flow field effect of square artificial reef with inclined side plates [J]. Periodical of Ocean University of China, 2025, 55(S1): 55-68.
- [2] 张年华,田涛,沈璐,等.人工鱼礁建礁材料研究应用进展[J].大连海洋大学学报,2022,37(2):352-362.
ZHANG Nianhua, TIAN Tao, SHEN Lu, et al. Research and application progress of artificial reef construction materials: A review [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2022, 37(2): 352-362.
- [3] VIVIER B, DAUVIN J C, NAVON M, et al. Marine artificial reefs, a meta-analysis of their design, objectives and effectiveness [J/OL]. Global Ecology and Conservation, 2021, 27. DOI:10.1016/j.gecco.2021.e01538.
- [4] 张培恒,王正旺,赵静,等.再生粗骨料复合聚丙烯纤维泡沫混凝土配合比设计与力学性能研究[J].混凝土,2025(4):257-262.
ZHANG Peiheng, WANG Zhengwang, ZHAO Jing, et al. Research on the mix design and mechanical properties of recycled coarse aggregate composite PP fiber lightweight concrete [J]. Concrete, 2025(4): 257-262.
- [5] 薛苗苗,刘巧会,刘周强,等.椰子纤维泡沫混凝土静动态力学性能研究[J].混凝土,2024(12):57-64.
XUE Miaomiao, LIU Qiaohui, LIU Zhouqiang, et al. Study on static and dynamic mechanical properties of coconut fiber foamed concrete [J]. Concrete, 2024(12): 57-64.
- [6] 陈柯,孙思齐,方强,等.玻璃纤维织物增强地聚合物砂浆弯曲力学性能试验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2025,44(3):87-96.
CHEN Ke, SUN Siqi, FANG Qiang, et al. Experimental investigation on flexural mechanical properties of glass fiber textile reinforced geopolymer mortar [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2025, 44(3): 87-96.
- [7] 王秀丽,潘旭宾,吴征.稻草纤维增强泡沫混凝土物理力学性能试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(3):189-197.
WANG Xiuli, PAN Xubin, WU Zheng. Experimental study on the physical and mechanical properties of straw fiber reinforced foam concrete [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(3): 189-197.
- [8] 李超飞,苏有文,陈国平,等.稻草纤维混凝土性能研究[J].混凝土,2013(10):30-32.
LI Chaofei, SU Youwen, CHEN Guoping, et al. Study on properties of straw fiber reinforced concrete [J]. Concrete, 2013(10): 30-32.
- [9] KOEHNKEN L, RINTOUL M S, GOICHOT M, et al. Impacts of riverine sand mining on freshwater ecosystems: A review of the scientific evidence and guidance for future research [J]. River Research and Applications, 2020, 36(3): 362-370.
- [10] KUO W T, WANG H Y, SHU C Y, et al. Engineering properties of controlled low-strength materials containing waste oyster shells [J]. Construction and Building Materials, 2013, 46(9): 128-133.
- [11] WANG H Y, KUO W T, LIN C C, et al. Study of the material properties of fly ash added to oyster cement mortar [J]. Construction and Building Materials, 2013, 41(4): 532-537.
- [12] KONG J F, CONG G W, NI S Y, et al. Recycling of waste oyster shell and recycled aggregate in the porous ecological

- concrete used for artificial reefs[J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2022, 323. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.126447.
- [13] OYEBISI S, ALOMAYRI T. Revolutionizing eco-friendly concrete: Unleashing pulverized oyster shell and corncob ash as cement alternatives for sustainable building[J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2025, 484. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2025.141776.
- [14] MENG Y T, DA B, YU X T, et al. Study on mechanical properties and durability of geopolymer concrete with oyster shell aggregate[J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2025, 472. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2025.140926.
- [15] 严亮, 赵玉青, 杨久俊, 等. 麦秸纤维对水泥浆体性能的影响[J]. *混凝土*, 2012(2):60-62.
YAN Liang, ZHAO Yuqing, YANG Jiujun, et al. Effect of wheat straw fibre on performance of cement paste[J]. *Concrete*, 2012(2):60-62.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 泡沫混凝土及制品试验方法:GB/T 43487—2023[S]. 北京:中国标准出版社, 2023.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局. 水泥砂浆和混凝土干燥收缩开裂性能试验方法:GB/T 29417—2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- [18] 王慧斌, 崔通, 陈捷, 等. 基于响应面法的机制砂路面混凝土配合比优化及其性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(5):1878-1888.
WANG Huibin, CUI Tong, CHEN Jie, et al. Mix proportion optimization and performance study of manufactured sand road concrete based on response surface methodology[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(5):1878-1888.

(责任编辑:吕海亮)